

RESUMEN

El objetivo principal del presente proyecto ha consistido en diseñar ensayos tribológicos Pin On Disk y RWAT (Rubber Wheel Abrasion Test) que simulen las condiciones en servicio de herramientas empleadas en procesos pulvimetalúrgicos para la posterior comparación de diferentes materiales y recubrimientos (High Speed Steels y recubrimientos de alta dureza). La finalidad es la prolongación de la vida en servicio de las herramientas de compactación (punzones, noyos y matrices).

El análisis de los mecanismos de desgaste de las herramientas, para el posterior diseño de los ensayos, fue posible gracias a la técnica de reproducción de superficies basada en la aplicación de material de impresión VPS (silicona de vinilpolisiloxano), técnica que permite reproducir “in situ” el negativo de la superficie de la herramienta sin necesidad de desensamblarla. Esta técnica, aun en fase de consolidación, ha permitido poder analizar la evolución de las superficies en función de los ciclos y ha abaratado el coste de dicho análisis. Uno de los objetivos de este proyecto es dar a conocer esta técnica puesto que por su coste y viabilidad la convierten en una muy buena opción a elegir cuando se plantea el análisis de la evolución de una superficie sin la posibilidad de disponer físicamente de la herramienta.

Para el análisis de los mecanismos de desgaste se han utilizado las técnicas de microscopía óptica, óptica confocal y microscopía electrónica de barrido (SEM). Mediante la microscopía óptica confocal y los programas de tratamiento de imagen SensoMap y SensoScan se ha analizado tanto la evolución de los parámetros superficiales bajo la normativa ISO 25178 como los defectos puntuales observables. Dentro de dichos defectos destacan los mecanismos de adhesión de polvo de sinterizado en las herramientas, así como mecanismos de rayado y desconche del recubrimiento duro. De los parámetros estudiables, el que permite relacionar los ensayos con la vida en servicio es el referente a la dirección de la textura superficial, y de los ensayos practicados, el más óptimo para la recreación de las condiciones reales y para la posterior comparación entre materiales es el RWAT.





SUMARIO

1. PREFACIO	5
1.1 Origen del proyecto	5
1.2 Motivación	5
1.3 Requerimientos previos	6
1.4 Objetivos del proyecto	6
2. INTRODUCCIÓN	8
2.1 Fundamentos de tribología. Fricción y desgaste.	8
2.2 Contacto mecánico	9
2.3 Fricción	9
2.4 Mecanismos de desgaste	12
2.4.1 Desgaste adhesivo	12
2.4.2 Desgaste abrasivo	12
2.4.3 Desgaste oscilatorio o “fretting”.	13
2.4.4 Desgaste por fatiga	13
2.4.5 Desgaste por impacto	14
2.4.6 Desgaste químico	14
3. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PIEZAS POR PULVIMETALÚRGIA	15
4. SISTEMA EXPERIMENTAL	18
4.1 Herramientas analizadas	18
4.2 Definición de los pares tribológicos críticos y su posible evolución.	18
4.3 Definición de las cotas críticas alteradas por desgaste.	22
4.4 Definición de las zonas críticas en las herramientas y metodología de su análisis.	23
4.5 Material del punzón y del noyo (HSS)	26
4.5.1 Material base	26
4.5.2 Recubrimiento de alta dureza (TiAlN)	27
4.6 Caracterización del polvo de sinterizado	28
4.7 Obtención de réplicas de silicona	29
4.8 Diseño de ensayos tribológicos	33
4.8.1 Ensayo: Pin on disk	33
4.8.1.1 Material y probetas	34
4.8.2 Ensayo: Rubber Wheel Abrasion Test	35
4.8.2.1 Material y probetas	38
4.9 Caracterización superficial de las herramientas, réplicas y muestras de ensayos tribológicos	39
4.9.1 Lupa	39
4.9.2 Microscopía confocal y microscopía electrónica de barrido (SEM)	39
5. RESULTADOS	43
5.1 Calibración de la silicona en la toma de réplicas	43
5.2 Caracterización del polvo de sinterizado	45
5.3 Identificación de los mecanismos de desgaste en nuyos una vez fuera de servicio.	50
5.4 Identificación de los mecanismos de desgaste en punzones una vez fuera de servicio.	54
5.5 Evolución de los mecanismos de desgaste con el número de ciclos	59
5.5.1 Evolución de los mecanismos de desgaste observados en el noyo.	60
5.5.1.1 Evolución de los parámetros de rugosidad superficial bajo normativa ISO 25178.	60



5.5.1.2 Evolución de los defectos puntuales.	64
5.5.1.3 Evolución del perfil de los pines.	65
5.5.2 Evolución de los mecanismos de desgaste en el punzón.	68
5.6 Diseño de ensayos tribológicos para reproducir los mecanismos de desgaste observados en las herramientas	70
5.6.1 Ensayos de abrasión (Rubber Wheel Abrasión Test).	71
5.6.2 Ensayos de fricción y desgaste "Pin on disk"	78
6. CONCLUSIONES GENERALES	84
7. ANÁLISIS MEDIOAMBIENTAL	86
8. PRESUPUESTO	87
9. AGRADECIMIENTOS	88
10. BIBLIOGRAFÍA Y PÁGINAS WEB	89



1. Prefacio

1.1 Origen del proyecto

Este proyecto se ha realizado en la Unidad de Tribología del Área de Tecnología de Materiales de la Fundación CTM (Centre Tecnològic de Manresa), bajo el marco del proyecto oPtiMa (*Incremento de eficiencia y competitividad de procesos pulvimetalúrgicos mediante optimización y predicción del rendimiento de herramientas de compactación y calibrado*), financiado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio con el objetivo de optimizar los materiales de herramientas empleados en los procesos pulvimetalúrgicos.

En los procesos pulvimetalúrgicos se procesan partículas cerámicas y metálicas de alta dureza donde las herramientas deben soportar elevadas tensiones y temperaturas, generándose, bajo estas condiciones, mecanismos de desgaste. El desgaste conlleva un coste muy elevado por el hecho que herramientas, como noyos o punzones, deben ser sustituidos cada cierto tiempo teniendo que interrumpir la producción en serie y además, añadirle el coste de la nueva herramienta a montar.

Lo que se pretende en este proyecto es analizar los fenómenos de desgaste existentes durante el proceso de compactación para la posterior puesta a punto de ensayos de laboratorio que los reproduzcan y permitan una comparación entre diferentes materiales, tratamientos térmicos y/o recubrimientos, con el objetivo de optimizar el proceso productivo.

1.2 Motivación

El mercado principal al que va destinado el proyecto es el pulvimetalúrgico (PM). Los procesos PM requieren producciones en largas series para lanzar piezas a precios competitivos en el mercado y para ello se requiere la reducción de los costes en reposición de herramientas y utillajes. Mediante la selección óptima y la mejora en el comportamiento de los materiales de herramienta, el sector podrá ganar cuota en mercados en los que actualmente no es competitivo. Esto se conseguirá porque se podrán realizar series más cortas, y satisfacer así la demanda dentro del sector del automóvil (en piezas en las que hasta ahora no era productivo) y en sectores de consumo creciente pero de mercado menos masivo que el del automóvil, como son, según indica la FIEE (Feria Internacional de la Industria Eléctrica de Energía y Automoción), la informática (+13 %), el de material eléctrico de instalación (+12 %) y el de utilidades domésticas (+16 %), etc., donde la cadena de valores es más cercana al cliente final. [FIEE].

Además, la producción en series más cortas beneficiará el desarrollo y fabricación de piezas funcionales y de prestaciones avanzadas, como por ejemplo los componentes magnéticos "softmagnetic". El mercado de los componentes magnéticos centrará en un futuro cercano la atención de los fabricantes de piezas PM, con nuevos requerimientos de calidad y materiales, debido a las nuevas necesidades de los vehículos eléctricos.



En este proyecto también se presenta una técnica innovadora para la inspección in situ del desgaste superficial en herramientas de producción. Dicha técnica consiste en la aplicación de un material de impresión (silicona VPS) el cual consigue reproducir con gran fidelidad la superficie de la herramienta y permite, sin necesidad de tener físicamente la herramienta dañada, analizar tanto los mecanismos de desgaste como su evolución a lo largo de la vida en servicio mediante la toma de réplicas cada cierto tiempo.

Esta técnica ya ha sido validada en otros estudios donde se ha estudiado la evolución de mecanismos de desgaste superficiales en herramientas de trabajo en frío utilizadas en procesos de doblado de chapa [1] y en procesos de estampado en caliente con y sin recubrimiento producidos por la técnica de PVD [2] y sus resultados son muy alentadores, aunque es una técnica que está en proceso de desarrollo. Por ese motivo este proyecto pretende, entre otras cosas, expandir el conocimiento de la técnica de la reproducción de superficies para su utilización en futuros proyectos.

1.3 Requerimientos previos

Los requerimientos previos mínimos para abordar la ejecución de este proyecto son:

- ✓ Conocimientos sólidos en el campo de la tribología.
- ✓ Conocimientos sólidos sobre Ciencia y Tecnología de Materiales.
- ✓ Conocimientos básicos de distintas técnicas de caracterización: microscopía óptica confocal, microscopía electrónica de barrido, espectroscopía de rayos X (EDX).
- ✓ Experiencia en la búsqueda y análisis bibliográfico de artículos y publicaciones científicas.
- ✓ Conocimientos sólidos en el uso de software de tratamientos de datos y análisis de imagen.

1.4 Objetivos del proyecto

Este proyecto tiene definidos los siguientes objetivos:

1. Identificación y cuantificación de los principales mecanismos de fallo en herramientas empleadas en procesos de compactación de piezas elaboradas mediante pulvimetalurgia.
2. Uso y validación de la técnica de reproducción “in situ” de superficies mediante el material VPS que permite el posterior análisis en laboratorio de los mecanismos de desgaste sufridos por las herramientas analizadas.
3. Diseño y puesta a punto de ensayos en laboratorio para la reproducción de los mecanismos de fallos observados. Con este objetivo se realizarán los siguientes tipos de ensayos:



- ✓ Configuración pin-on-disc/ball-on-disc bajo normativa ASTM G99 [3] modificada: Poniéndose en contacto los mismos materiales que están en contacto en el proceso industrial (p. ej. Empleando discos de compactos en verde y pines de acero de herramienta y/o metal duro), en condiciones lo más cercanas posible a las de la aplicación industrial (presión, velocidad de deslizamiento, número de ciclos).
- ✓ Ensayos de desgaste abrasivo: Para estudiar la abrasividad del polvo metálico se modificará el ensayo definido en la norma ASTM G65-04 [4], de forma que se utilizará el polvo bajo estudio en vez de arena como abrasivo.



2. Introducción

2.1 Fundamentos de tribología. Fricción y desgaste.

La palabra “tribología” viene derivada de la palabra griega “tribos” la cual significa frotamiento, por tanto la traducción literal podría ser “la ciencia del frotamiento”. Los diccionarios definen tribología como la ciencia y la tecnología de superficies interactuando en movimiento relativo y prácticas relacionadas. La tribología estudia condiciones de operación aplicadas a problemas de gran significado económico, es decir, fiabilidad, mantenimiento, y desgaste de equipo técnico, en el rango de dispositivos desde naves espaciales hasta del hogar. Las interacciones superficiales en una interfase tribológica son altamente complejas, y su entendimiento requiere conocimiento de varias disciplinas incluyendo física, química, matemáticas aplicadas, mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, termodinámica, transferencia de calor, lubricación, diseño de máquinas, entre otras.

El estudio de las propiedades tribológicas de los materiales es de gran importancia para el éxito en el diseño de piezas y mecanismos de trabajo. Se trata de extender la vida útil y optimizar las prestaciones de los sistemas mecánicos que se encuentran al servicio de la raza humana, aumentando su eficiencia y mejorando su rendimiento. Básicamente, la “ciencia del frotamiento” se basa en el estudio de tres fenómenos: la fricción entre dos cuerpos en movimiento, el desgaste provocado como consecuencia de ese movimiento y la lubricación como un medio para evitar dicho desgaste.

La tecnología de superficies proporciona herramientas para aumentar la resistencia al desgaste, la corrosión y/o propiedades estéticas de las superficies. Los tratamientos superficiales que se conocen incluyen, por un lado, a los tratamientos térmicos y termoquímicos, los cuales modifican la estructura o composición química de la superficie sin añadir ninguna capa extra, y por otro, a los recubrimientos superficiales entre los que se incluyen los recubrimientos de capa fina, que suponen la adición de una o varias capa de otros materiales. La finalidad de estos tratamientos es, en general, aumentar la resistencia del material a alguna de las agresiones que puede sufrir en instalación y servicio. Las agresiones que tienen mayor incidencia sobre la degradación de una superficie son corrosión, desgaste y fatiga.

La voluntad de mitigar el efecto de las agresiones que sufren los componentes mecánicos y acertar con el método de prevención más adecuado, ha llevado a reconocer el valor del estudio de las superficies y el entendimiento de los mecanismos que allí se generan, ya que de éstos se derivan la mayoría de los fallos. En definitiva, es necesario conocer las propiedades tribológicas de las superficies para comprender mejor y optimizar el comportamiento mecánico del conjunto.



2.2 Contacto mecánico

Cuando dos superficies nominalmente planas son colocadas en contacto, la rugosidad superficial causa muchos puntos de contacto discreto, Figura 2.1. La suma de las áreas de todos los puntos en contacto constituye el área real de contacto o simplemente el área de contacto, y para la mayoría de los materiales ésta sólo será una pequeña fracción del área aparente (nominal) de contacto, la cual ocurriría si las superficies fueran perfectamente lisas. El área real de contacto es una función de la textura superficial, propiedades del material y las condiciones de carga.

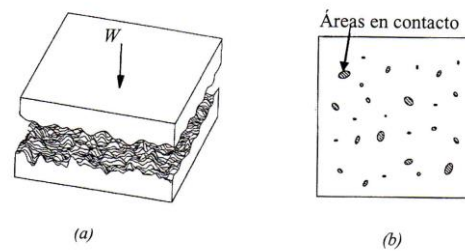


Figura.- 2.1. Esquema de dos superficies en contacto (a) y del área real de contacto (b). [5]

Inicialmente el contacto entre dos superficies ocurrirá en pocos puntos que soportan la carga normal W , cuando la carga normal es aumentada, el número de asperezas en contacto aumenta y el área de los contactos crece también para soportar la carga aumentada. En la región de los puntos de contacto ocurre deformación, estableciendo tensiones que son opuestas a la carga aplicada. El modo de la deformación superficial puede ser elástico, plástico, o bien viscoelástico. Las tensiones locales en los puntos de contacto son mucho más altas que las tensiones nominales calculadas según el área nominal de contacto. Aunque las tensiones nominales pueden estar en el rango elástico, las tensiones locales pueden exceder el límite elástico y el contacto cederá plásticamente.

Las propiedades tribológicas que se estudian en este trabajo son la fricción y el desgaste, ambos fenómenos referidos al deslizamiento en seco, sin lubricación, que en la práctica solamente es realizable cuando los pares en deslizamiento están formados por cuerpos sólidos.

2.3 Fricción

Cuando se intenta desplazar dos cuerpos en contacto, la fuerza que se opone al movimiento es la "Fuerza de fricción". La fricción se define como la resistencia al movimiento que es experimentada durante el deslizamiento, cuando un cuerpo de peso P se mueve tangencialmente sobre otro con el cual está en contacto. La fuerza tangencial resistiva, la cual actúa en una dirección directamente opuesta a la dirección del movimiento, es llamada fuerza de fricción F_r :



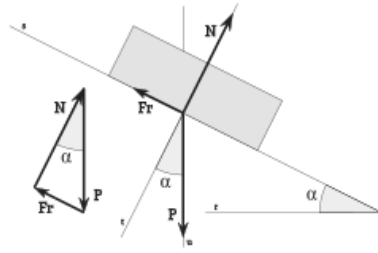


Figura.- 2.2. Diagrama de fuerzas en un plano inclinado. P: Peso; N: Fuerza Normal; Fr: Fuerza de fricción; α : Ángulo inclinación. [6]

Si dos cuerpos se colocan en contacto, el valor de la fuerza tangencial que es requerido para iniciar el movimiento es la fuerza estática F_e . La fuerza tangencial requerida para mantener el movimiento relativo es conocida como la fuerza de fricción cinética o dinámica, F_d . La fuerza de fricción estática es mayor o igual a la fuerza de fricción cinética. La fricción no es una propiedad del material, es una respuesta del sistema.

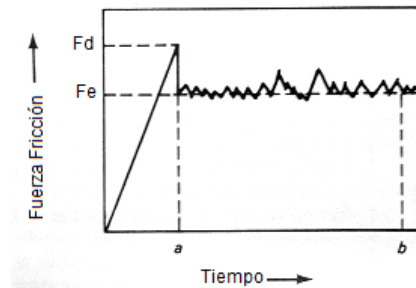


Figura.- 2.3. Coeficiente de fricción versus Fuerza aplicada. Muestra la diferencia entre el coeficiente de fricción estático y el dinámico. [6]

Existen dos leyes básicas de fricción que se cumplen en un amplio rango de aplicaciones. Estas leyes son conocidas como leyes de Amontons, después de que el físico francés Guillaume Amontons las definiera en 1750 [7]. La descripción de estas leyes inicia con:

$$Fr = \mu N \text{ (ecuación 1)}$$

Donde Fr es la fuerza de fricción, N es la carga normal sobre el contacto y μ es una constante conocida como el coeficiente de fricción estático (μ_e) o coeficiente de fricción cinético (μ_d) que es independiente de la carga normal. En el caso de la fuerza de fricción estática es posible expresar esta ley en términos de ángulo de reposo límite α definido por:

$$\mu_e = \tan \alpha \text{ (ecuación 2)}$$

En esta ecuación, α es el ángulo tal que un cuerpo de peso (P), colocado sobre un plano inclinado a un ángulo menor que α desde la horizontal permanezca estacionario mientras que si se aumenta la inclinación del ángulo α , el cuerpo empezará a deslizar hacia abajo (Figura 2.2). Estas consideraciones se cumplen igualmente para los casos de fricción sin y con lubricación.



La segunda ley plantea que la fuerza de fricción (o coeficiente de fricción) es independiente del área aparente de contacto entre los cuerpos en contacto, (pero no del área real de contacto) por este motivo un paralelepípedo de cualquier peso sufrirá la misma fuerza de fricción apoyado sobre cualquiera de sus caras.

A estas dos leyes se añade una tercera ley, que es con frecuencia atribuida a Coulomb (1785) [7]. Esta ley estipula que la fuerza de fricción cinética (o coeficiente de fricción) es independiente de la velocidad de deslizamiento una vez el movimiento empieza.

Ninguna de las leyes de fricción tiene en cuenta los mecanismos de desgaste que hacen variar la fuerza de fricción cuando suceden. Cuando la fuerza de fricción estática F_e se supera e interviene la fuerza de fricción dinámica, F_d , se produce la interacción entre superficies generando un par tribológico. Este par tribológico al cabo del tiempo se empieza a ver afectado por la generación de mecanismos de desgaste entre las superficies. Según sean las propiedades de las superficies, la fuerza de fricción variará de una manera u otra. El proceso que normalmente sucede es el que se puede ver en la Figura 2.4 b) y c) donde la fuerza de fricción varía con el tiempo en función de los mecanismos de desgaste que van sucediendo a lo largo del tiempo. La Figura 2.4 a) representa un la evolución de un sistema donde no hay desgaste o éste no implica una variación en la superficie del par tribológico.

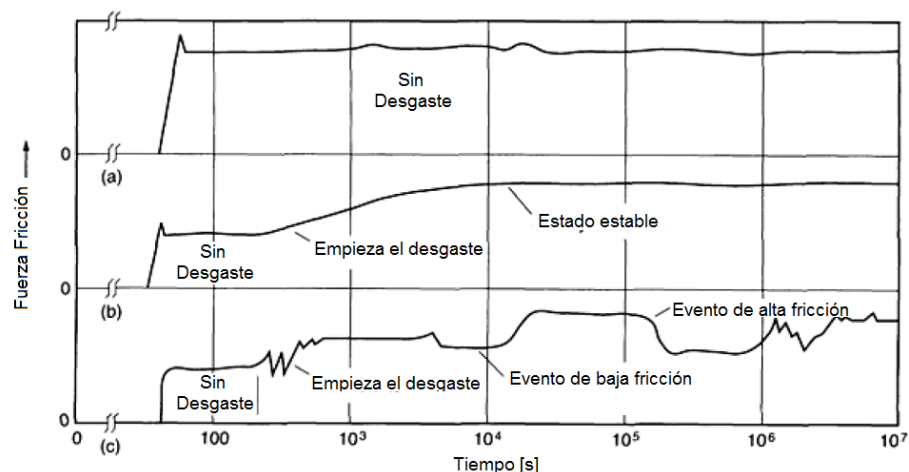


Figura.- 2.4. Efecto del desgaste en la fuerza de fricción: a) Sistema sin desgaste o sin cambio del comportamiento tribológico a pesar del desgaste; b) Sistema donde la fuerza de fricción incrementa con el tiempo alcanzando el estado estable; c) Sistema donde la fuerza de fricción varía con cada uno de los mecanismos de desgaste sucesivos ocurrientes. [6]



2.4 Mecanismos de desgaste

Por desgaste se entiende el daño superficial producido por remoción de material en una superficie sólida como resultado del movimiento relativo de esta superficie respecto a otra con la que se encuentra en contacto.

Procesos mecánicos y químicos son los precursores del desgaste. Dentro de dichos procesos se pueden distinguir varios mecanismos los cuales se superponen, complementan o se suceden. A continuación se explican los procesos existentes más comunes.

2.4.1 Desgaste adhesivo

El desgaste adhesivo es consecuencia de los grandes esfuerzos generados en los puntos de contacto reales. Dicha presiones de contacto pueden generar una adhesión química instantánea dando lugar a una soldadura en frío. Este fenómeno tiende a incrementar la resistencia al movimiento relativo entre las superficies pero si éste se mantiene, las microsoldaduras son cortadas generando la aparición de micropartículas que quedaran atrapadas entre las superficies.

2.4.2 Desgaste abrasivo

El desgaste abrasivo es el resultado de la interacción mecánica entre las superficies en contacto. Ésta puede ser producida por penetración de asperezas de la superficie de mayor dureza en la superficie de menor dureza (conocida como abrasión por dos cuerpos), o bien por partículas abrasivas atrapadas entre las dos superficies (abrasión por tercer cuerpo). Los mecanismos de desgaste que actúan son, función de la ductilidad y del límite elástico de la superficie, y el resultado es el rayado superficial dando lugar a deformación plástica y el desprendimiento por fractura frágil de pequeños fragmentos.

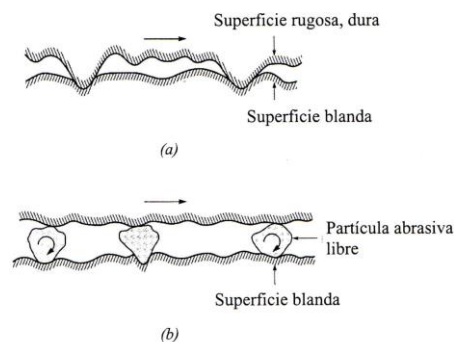


Figura.- 2.5. Esquema de desgaste abrasivo por contacto de asperezas de superficies dura sobre superficie blanda (a) y por tercer cuerpo (b). [5]



Las partículas libres que producen abrasión por tercer cuerpo pueden provenir del medio o del mismo mecanismo de desgaste, partículas producidas como consecuencia de un anterior mecanismo de desgaste adhesivo.

2.4.3 Desgaste oscilatorio o “fretting”.

Está producido por un movimiento oscilatorio de muy baja amplitud en dirección paralela al plano de contacto entre superficies que están en reposo. Se observa mayoritariamente en partes ensambladas de maquinaria sujeta a vibración. Lo que sucede es que las cargas normales a la superficie generan la adhesión de la asperezas de la misma pero al existir el movimiento oscilatorio tangencial a las superficies, estas microsoldaduras acaban por romperse generando a su vez partículas sueltas que actúan como tercer cuerpo y producen desgaste abrasivo. Si las cargas normales y el fenómeno oscilatorio alcanzan niveles críticos podría aparecer el fenómeno de fatiga superficial y también, si las superficies son susceptibles de ser oxidadas, el óxido puede ser removido generando desgaste químico.

Así, el desgaste oscilatorio puede dar lugar a la aparición de hasta cuatro tipos de desgaste: desgaste adhesivo, abrasivo, por fatiga y químico.

2.4.4 Desgaste por fatiga

La fatiga superficial produce la aparición de grietas superficiales. Existen varios mecanismos que la producen y pueden ser debidos a cargas de contacto o a cargas térmicas.

La fatiga por carga de contacto se produce por la repetición cíclica de fluctuaciones sobre una pequeña área de la superficie. Las grietas van avanzando hasta que al cabo de un número crítico de ciclos se produce la rotura de la superficie. Estos mecanismos pueden ser debidos a esfuerzos normales o tangenciales, cuando son tangenciales nos encontramos con el mecanismo de “Fretting” (rozamiento). Cuando este mecanismo ocurre cíclicamente, puede ocasionar fatiga por rozamiento generando grietas superficiales las cuales pueden conllevar la rotura catastrófica del ensamblaje.

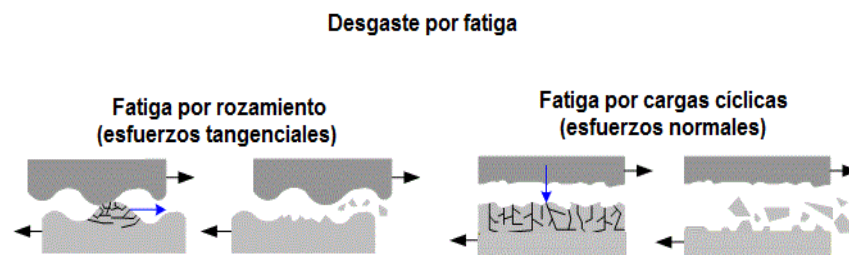


Figura.-2.6. Esquemas de mecanismos de desgaste por fatiga de contacto. [SBTCH]



La fatiga por carga térmica se produce cuando existen cambios drásticos y cíclicos de temperatura superficial. Las dilataciones y contracciones inducidas generan grietas para aliviar las tensiones internas.

2.4.5 Desgaste por impacto

El desgaste por impacto conlleva la remoción de material de una superficie por el impacto a alta velocidad de un flujo el cual puede ser líquido o compuesto por un fluido que transporta partículas duras. Según esta diferenciación se distinguen dos tipos de desgaste: erosión por partícula y erosión por cavitación.

El desgaste por erosión por partícula viene dado por un flujo de partículas sólidas que al impactar contra una superficie le producen deformación plástica o fractura frágil. Dentro de este tipo de desgaste se distinguen dos fenómenos de erosión. Por un lado la erosión producida por partículas al azar que responde a lo anteriormente descrito y por otro lado está el desgaste por impacto. El desgaste por impacto se produce cuando colisiones se suceden repetidamente sobre un mismo punto de la superficie.

El desgaste por erosión debido a la cavitación se genera cuando un fluido a grandes velocidades u ondas sónicas de gran energía producen “burbujas” de vacío que al colapsar llegan a producir grandes presiones en la superficie. Estas grandes presiones generan deformaciones locales y fracturas superficiales.

2.4.6 Desgaste químico

También llamado desgaste oxidativo o corrosivo según la razón de la formación del óxido en superficie. Este fenómeno acompañado, de otros tipos de desgaste como fatiga, abrasión o erosión, genera la liberación de partículas de óxido, que quedan sueltas, a la vez que deja parte del material base en contacto con el medio, oxidándose y repitiendo el mecanismo.

Se denomina desgaste oxidativo cuando el óxido se produce a altas temperaturas, sin embargo, cuando éste se produce por contacto con el aire a temperatura ambiente, se le llama desgaste corrosivo.



3. Proceso de producción de piezas por pulvimetalurgia

La pulvimetalurgia consiste en la producción de piezas por medio de la compactación de polvo metálico (etapa de compactación) y su posterior calentamiento (etapa de sinterización) a temperaturas por debajo del punto de fusión del material. Este proceso se emplea para la fabricación de grandes series de piezas pequeñas de elevada precisión, para materiales o mezclas de materiales poco comunes y también para controlar el grado de porosidad o permeabilidad de la pieza final. Algunos productos producidos mediante este proceso son:

- ✓ Piezas estructurales (sobre todo para el automóvil): piezas para caja de cambios, distribución, bomba de aceite, sistema de frenado, árbol de levas, dirección asistida.
- ✓ Cojinetes, cojinetes autolubricados.
- ✓ Filtros para: eliminación de impurezas en instalaciones de fuel-oil, eliminación de impurezas en elementos hidráulicos, filtrado de agua pesada en reactores nucleares, filtrado de gasolina para aviación, separación de líquidos en suspensión en un gas y de 2 líquidos o gases, difusión, regasificación de aguas minerales, fluidificación, etc.

En la Figura 3.1 se muestran las etapas básicas del proceso. La fabricación de componentes pulvimetalúrgicos se inicia con la mezcla de polvo metálico con lubricantes (por ejemplo Estearato de zinc) y aditivos. Esta mezcla es compactada dándole la morfología de la pieza dentro de un molde con la forma deseada mediante la aplicación de presión (para acero oscila entre 400 y 700 MPa). Después de la compactación, el polvo toma las propiedades de un sólido y en dicho estado del proceso la pieza se denomina usualmente “en verde”. Posteriormente, el sinterizado bajo atmósfera controlada produce la unión metalúrgica de partículas. Algunas piezas son utilizadas directamente en la condición de sinterizado mientras que otras son sometidas a operaciones secundarias de acabado (calibrado, mecanizado, impregnación de aceite, etc.) o tratamientos térmicos (nitruración, temple, etc.). [8][9]



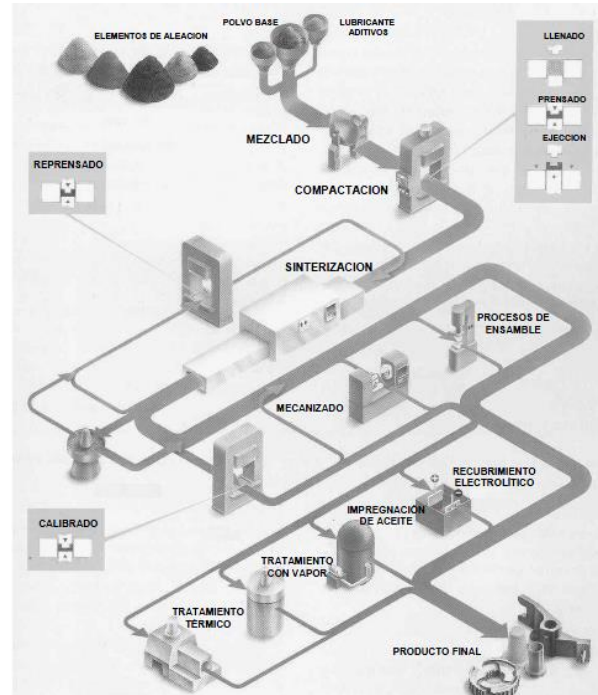


Figura.-3.1. Etapas básicas del proceso de pulvimetalúrgia.

Los objetivos básicos de la etapa de compactación son reducir la porosidad, densificar uniformemente y producir la geometría adecuada de la pieza. Existe una gran variedad de procesos que permiten fabricar un compacto a partir de polvos (prensado en matriz simple, prensado doble, compactación en caliente o aplicación del lubricante en las paredes del molde, entre otros). Entre los más utilizados cabe destacar el prensado en matriz (simple o doble). Es el método más simple y se realiza en distintas fases.

El proceso inicia con el llenado de la matriz con el polvo a compactar a través de un alimentador. A continuación, el movimiento del punzón aumenta la presión sobre el material hasta producir la geometría final con la densidad deseada, y finalmente se retira el punzón y se expulsa la pieza de la matriz. Es en esta etapa de compactación donde las herramientas están sometidas a elevadas solicitaciones tribomecánicas: altas presiones durante la aplicación de la carga, contacto con polvo abrasivo, y elevada fricción durante la extracción de las piezas.

Dado que la mayoría de las piezas pulvimetalúrgicas son porosas después de la sinterización, uno de los procesos secundarios más comunes es el calibrado. Los objetivos básicos de esta operación son la eliminación de la porosidad residual y el ajuste de dimensiones finales de la pieza. Algunas veces se opta por realizar esta operación acompañada de un calentamiento, para disminuir el límite elástico de la pieza con la temperatura. Dependiendo del grado de deformación deseado, este tratamiento se conoce como reprensado, calibrado o acuñado (en orden descendente de deformación). Durante esta operación secundaria, los poros superficiales son sellados y los internos permanecen sin alteración. Las solicitaciones de las herramientas en este caso son menos severas, puesto que el recorrido de los punzones es menor que en la compactación.



Los utillajes de compactación y calibrado están típicamente integrados por cuatro elementos, como indica la Figura 3.2 el punzón superior, la matriz, el noyo y el punzón inferior. Por el tipo de solicitaciones tribomecánicas que reciben los punzones (elevadas presiones axiales durante la aplicación de carga) suelen construirse con aceros de herramienta de elevada resistencia al desgaste y niveles moderados de tenacidad (normalmente aceros rápidos (HSS)). Por su parte, matrices y noyos están más expuestos a los esfuerzos laterales de fricción y al contacto con el polvo abrasivo, y por tanto, se fabrican con acero de herramienta o muy menudo, en series de larga duración (de más de 100000 piezas), con metal duro. Es posible obtener una elevada precisión empleando herramientas de metal duro con acabados obtenidos por electro-erosión o mediante herramientas de diamante. Sin embargo los costes para producir este tipo de herramientas son altos y se requiere un mínimo de partes a producir (entre 20000 y 50000) para que el proceso sea rentable [9].

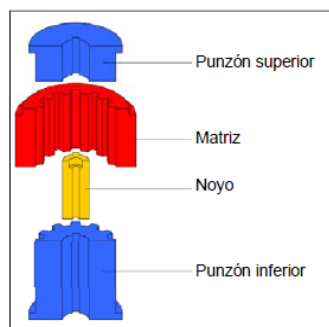


Figura.- 3.2. Elementos típicos en una matriz de compactación y calibrado: punzón superior e inferior, matriz y noyo.

En resumen, las principales solicitaciones y mecanismos de fallo que experimentan los utillajes de compactación y calibrado que se analizan en este proyecto se resumen de la siguiente manera:

- **Punzones superiores e inferiores:** deben resistir a la expansión bajo cada ciclo de compactación o calibrado, por lo que deben presentar elevado límite elástico a compresión junto con niveles de tenacidad aceptables y gran resistencia a fatiga. También requieren elevada resistencia al desgaste, aunque el mecanismo de fallo principal son las roturas.

- **Noyo:** debe presentar una elevada dureza y resistencia al desgaste, aunque están sujetos a cargas dinámicas cíclicas durante la compactación y el calibrado que, a menudo y sobretodo en noyos de sección pequeña o diseño complicado, provocan roturas por deflexiones.



4. Sistema experimental

Considerando los puntos explicados anteriormente, se prosigue a definir como se han caracterizado los mecanismos de desgaste específicos de las herramientas analizadas (punzones y noyos). También se definirán las técnicas y los equipos utilizados que han permitido la comprensión de los mecanismos de desgaste y su reproducción en ensayos a escala de laboratorio.

4.1 Herramientas analizadas

Para producir un componente de una bobina se requiere de tres herramientas, dos de las cuales serán caracterizadas en este proyecto. A continuación se sitúan las herramientas analizadas:

- **Noyo:** Encargado de producir la morfología interior de la pieza así como los agujeros pequeños en la parte superior de la pieza. Su posición en el ensamblaje es vertical al suelo con los cilindros encargados de producir los agujeros mencionados, en su parte superior mirando hacia arriba. Está compuesto por un cilindro hueco de diámetro exterior de 17 milímetros con un espesor de paredes del orden de 4 milímetros. De la parte superior del cilindro, en la cara plana, tiene mecanizados dos cilindros paralelos al eje longitudinal del noyo los cuales tienen una cara plana tangente al cilindro hueco que forma el cuerpo del noyo. Su longitud es del orden del centímetro y su finalidad es producir los orificios de la pieza final. El material base de los noyos analizados es ASP2012 tratado para tener 60-62 HRC.
- **Punzón:** Encargado de dar la morfología de la parte superior de la pieza así como de aplicar la presión de compactación al conjunto. Su posición respecto al suelo es vertical y su sujeción se realiza por su parte superior, quedando la parte encargada de dar forma a la pieza en la parte inferior. El punzón está fabricado en HSS (ASP2012) tratado a 60-62 HRC y todos los punzones analizados llevan el recubrimiento BALINIT® FUTURA NANO confiriéndole un color azulado violeta.

4.2 Definición de los pares tribológicos críticos y su posible evolución.

La sucesión de acciones que se necesitan para la producción de una pieza es la siguiente:

1º) Se introduce el polvo de sinterizado base Fe en la cavidad que existe entre la matriz, el noyo inferior y el centrador (elemento que sirve para centrar todas las herramientas).

2º) Baja el punzón superior y sube el noyo inferior hasta la cota deseada ejerciendo la presión de compactación. En esta operación, los cilindros superiores del noyo se introducen en unos orificios dispuestos en el punzón para dicha misión.



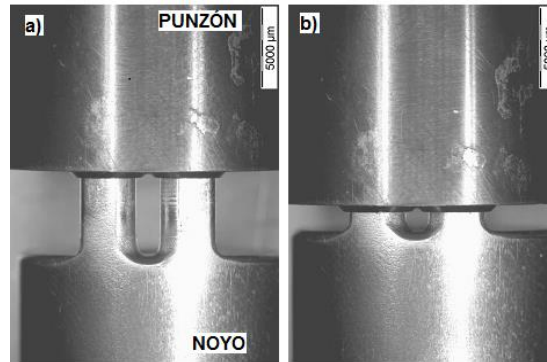


Figura.- 4.1. Movimiento relativo entre el noyo y el punzón: a) Posición inicial; b) Posición de compactación.

3º) Se retira el punzón y sube el noyo extrayendo la pieza.

4º) Se retira la pieza para introducir de nuevo polvo.

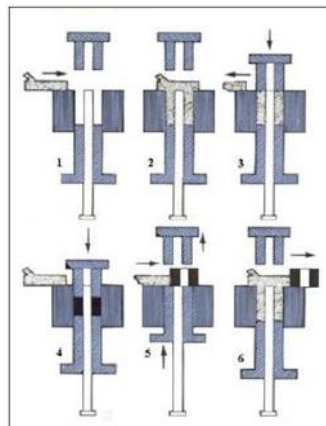


Figura.- 4.2. Esquema secuencial del ciclo de compactación (no equivale a la pieza final de este proyecto)

Se definen los siguientes pares tribológicos:

- Superficie cilíndrica exterior del punzón en movimiento relativo a la superficie interior de la matriz. Entre ellas pueden introducirse polvo de sinterizado. (Figura 4.2. (4))
- Superficie inferior del punzón versus polvo de sinterizado. (3 y 4)
- Superficie interior de los agujeros del punzón en movimiento relativo a la superficie exterior de los cilindros situados en la parte superior del noyo. Puede introducirse polvo de sinterizado entre ambas. (4)
- Superficie cilíndrica exterior del noyo versus superficie interior matriz. Puede introducirse polvo de sinterizado entre ambas. (5)



- Superficie superior noyo más superficie de los cilindros superiores versus polvo de sinterizado. (4 y 5)

En cada ciclo hay dos acciones que son más críticas que el resto por las tensiones que se generan. La primera es la compresión del polvo para la densificación y compactación de la pieza (Figura 4.2 (4) y la segunda es el momento en que se descomprime la pieza compactado y se extrae.

En la Figura 4.3 se muestra la presión necesaria para conseguir una densidad de pieza deseada. La pieza producida en el proceso analizado tiene una densidad media entorno a 7 gr/cm^3 , para conseguir dicha densidad, se requieren presiones de compactación desde 700 a 800 MPa. Además, estas presiones pueden verse ampliamente incrementadas en puntos de contacto local (debidas a que el área real de contacto es inferior al área nominal).

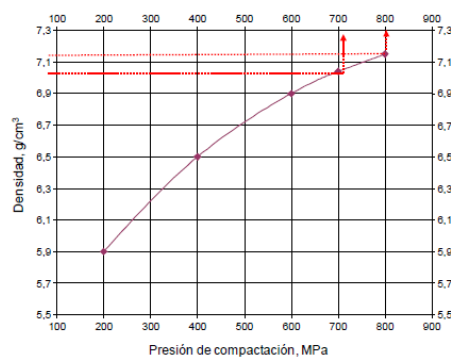


Figura.- 4.3. Densidad de la pieza versus presión de compactación de la prensa.

También destacar que en la pieza encontramos un diferencial de densidades que viene dado por la morfología de las herramientas de compactación y por la posición relativa de la pieza a la herramienta. Así podemos llegar a $7,1 \text{ gr/cm}^3$ en la zona entre los agujeros superiores de la pieza. Zona que queda entre los “pines” (pequeños cilindros del noyo) a la hora de compactar y $6,8 \text{ gr/cm}^3$ en la parte lateral central de la pieza. También se observa un diferencial de densidades a lo largo del eje longitudinal de la pieza.

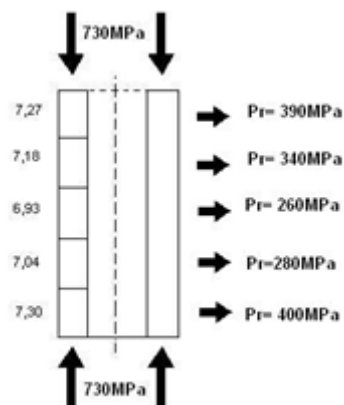


Figura.- 4.4. Ejemplo de las densidades obtenidas en un proceso de compactación de un cilindro.



Estas elevadas presiones de compactación hacen que el material compactado este deformado tanto elástica como plásticamente. La deformación plástica se observa en la deformación de las partículas de polvo que se acomodan y rellenan los espacios de aire entre partículas. En cambio, la deformación elástica queda como remanente de energía almacenada en el material que no se libera hasta la descompresión del conjunto. Dicha deformación elastica viene dada por la compresión longitudinal de la pieza acarreado que se generen tensiones perpendiculares a la superficie exterior de la pieza (inerficie polvo – herramientas) que al estar confinada en un espacio concreto, no puede expandir sus cotas transversales para la relajación de las tensiones internas. Este comprtamiento de expansión transversal en frente a la compresión longitudinal lo definimos como “spring back” de la pieza.

El segundo momento crítico durante el ciclo es el momento en que sucede la descompresión del conjunto y la extracción de la pieza. Para ello, el ensamblaje noyo – punzón debe ser separado cono un movimiento relativo paralelo al eje del anillo que forma la matriz. A la vez que esto ocurre, las tensiones generadas por la compresión elástica, tendiendo a la descompresión, ejercen una fuerza normal a la superficie de las herramientas que puede generar una alta fuerza tangencial a la superficie (fuerza de fricción) que depende del coeficiente de fricción de los materiales en contacto y de las tensiones normales a la superficie. Sus repercusiones pueden ser:

- Oposición al movimiento relativo entra las herramientas del ensamblaje.
- Puede incrementar la temperatura superficial produciendo microsoldadura y acelerando mecanismos de desgaste químico.
- Se puede generar el fenómeno de Scuffing (adhesión) por una ausencia de lubricante lo cual podría dar lugar a adhesión de material, deformación plástica de la superficie y generación de terceras partículas que pueden dar lugar a desgaste por abrasión.
- Puede generar un rayado por contacto del polvo abrasivo con la superficie de la herramienta, el cual deforma plásticamente la superficie. Su dirección debe ser paralela al movimiento relativo entre herramientas y pieza.
- Se pueden generar fenómenos de desconchado en las harremientas que tengan recubrimiento.
- Grandes tensiones normales a la superficie pueden generar microsoldaduras que den origen a desgaste por adhesión.

Además, existe la posibilidad que las partículas de polvo se introduzcan entre las superficies de las herramientas. Su pequeña dimensión permite que al incrementarse mínimamente alguna tolerancia del conjunto, se introduzca polvo entre superficies pudiendo dar lugar a gripajes. Por todas estas razones, el momento de la extracción de la pieza es la segunda acción crítica a analizar.



4.3 Definición de las cotas críticas alteradas por desgaste.

La repercusión de los mecanismos anteriormente descritos en la dinámica del proceso industrial se observa como la retirada de las herramientas por desgaste. Se definen dos tolerancias críticas referidas a la pieza que motivan a la retirada de la herramienta desgastada de la producción como:

1. El diametro y morfología de los agujeros superiores de la pieza. El diámetro es una variable dependiente del diámetro de los pines del noyo, los cuales estan situados en la zona de máxima densidad y tensión de la pieza. En la Figura 4.5 se muestra una imagen del detalle de los agujeros.

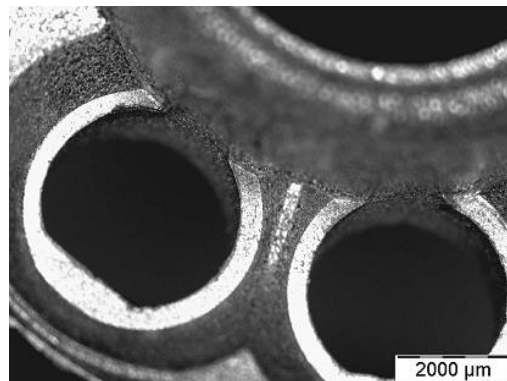


Figura.- 4.5 .Imagen tomada con lupa. Detalle de los orificios pequeños de la pieza.

2. Esta interficie punzón – noyo también es la responsable de la morfología de la parte exterior de los agujeros. En la siguiente imagen se muestra la otra tolerancia crítica.

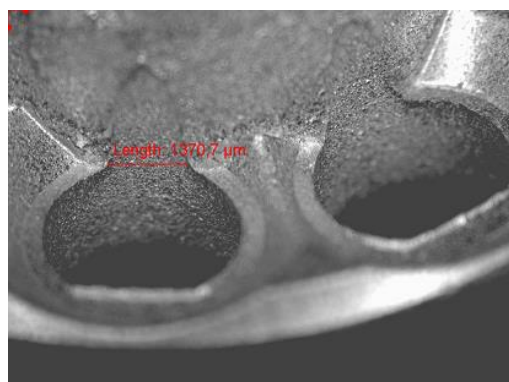


Figura.- 4.6. Imagen tomada con lupa. Detalle y dimensión de la pestaña generada por la interficie punzón – noyo.

Esta cota, es crítica por el hecho que cuando sobrepasa la cota límite, su apertura incrementa la tolerancia entre el noyo y el punzón posibilitando la introducción de polvo en la



interficie noyo – punzón. Este proceso acarrea adhesión de material y abrasión en dicha interficie y es consecuencia de la fractura frágil de la zona del punzón diseñada para tal fin.

Para el control en producción de las cotas, el análisis se realiza mediante un sistema de “pasa o no pasa” mediante un calibre que marca las tolerancias mínimas de los agujeros (marcadas por el cliente) después de la sinterización .



Figura.- 4.7 Calibre utilizado como “pasa no pasa”.

Cada par tribológico se comporta de una manera diferente puesto que las condiciones varían de uno a otro. De momento se han planteado los diferentes pares tribológicos existentes en el ensamblaje y cuales son las tolerancias críticas para la continuidad del proceso productivo.

Definición de las zonas críticas en las herramientas y metodología de su analisis.

Teniendo en cuenta las zonas críticas de las herramientas involucradas en su retirada de la producción y para el posterior análisis sistemático de la evolución de los mecanismos de desgaste en las herramientas del proceso analizado, se definen las siguientes zonas de estudio y la metodología que se va a llevar a cabo.

- **Noyo**

Se requiere analizar la evolución de la superficie anterior de los pines del noyo a lo largo de su vida en servicio. Para ello se obtienen los parámetros de rugosidad superficial más representativos y la dimensión de defectos tales como profundidad de surcos o altura del material adherido, en la parte anterior de los pines. Para cada pin se toma una imagen de la zona superior y de la inferior, tal como se muestra en la Figura 4.8. Para la identificación de cada zona se determina que:

- ✓ A: Anterior. Cara anterior de los pines.
- ✓ S: Superior. Zona superior de los pines, zona menos dañada.
- ✓ I: Inferior. Zona inferior de los pines, donde se observa mayor daño.



- ✓ D, I: Pin derecho e izquierdo, respectivamente. Los resultados son el promedio de los dos lados

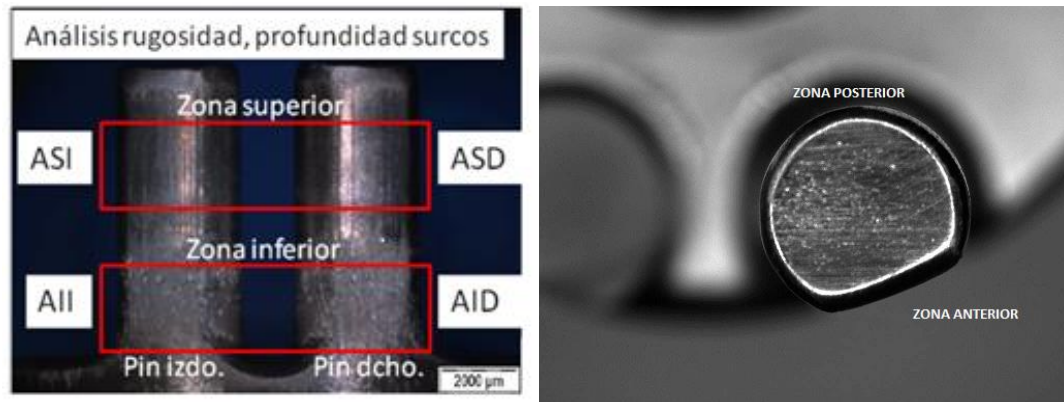


Figura.- 4.8. Denominación de las zonas de los pines y vista superior del pin derecho, respectivamente.

La metodología para el cálculo de los parámetros ha sido la siguiente:

1. Obtención de una imagen de cada zona definida anteriormente como ASD, AID, ASI y AII a 200x de cada réplica obtenida. De tamaño máximo permitido por geometría pin: 1.15x0.86 mm².
2. Cálculo de los valores medios entre el lado derecho y el izquierdo. ASD con ASI y AID con AII.
3. Se grafican los siguientes parámetros:
 - ✓ Parámetros de amplitud 3D: Sa, Sq, Sz, Sv, y Sp.
 - ✓ Parámetros 3D para el análisis espectral de superficies: Str.
 - ✓ Parámetros híbridos: Sdr.
 - ✓ Direcciones principales de la textura superficial.

También se requiere determinar la evolución del perfil anterior de los pines (Figura 4.9) el cual está relacionado con la cota crítica relacionada con el diámetro de los agujeros de la pieza. Para ello se toma una imagen del perfil dañado mediante microscopía confocal para la posterior obtención del perfil medio mediante el software SensoMap. Para la comparación entre perfiles se necesita una referencia común entre todas las mediciones. La referencia utilizada es la parte no desgastada circundante a la gastada (no está en contacto con el polvo en el momento de la compactación), la cual al no sufrir tanto desgaste, se puede suponer como constante durante todo el proceso. Es por eso que se decide obtener perfiles que sobrepasan la zona dañada (Figura 4.9). El programa SensoMap tiene la opción de medir tanto el área como la profundidad que dibuja el defecto en el perfil obtenido.



Para determinar la profundidad de desgaste en la zona inferior de los pines se ha seguido la siguiente metodología (ver Figura 4.9):

- ✓ Obtención de imágenes topográficas mediante microscopia confocal de la zona inferior de los pines (200X, $\geq 3,5 \times 0,625 \text{ mm}^2$).
- ✓ Extracción de perfiles con el programa SensoMap, obtención del perfil, medida de la profundidad máxima del perfil y área desgastada (área en rojo en la Figura.- 4.9 b)).

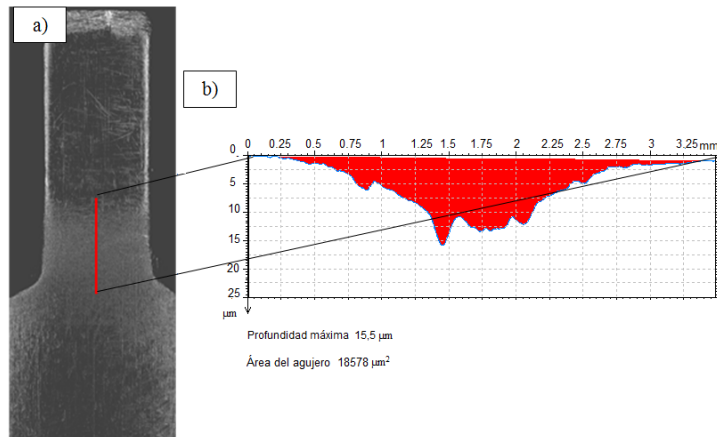


Figura.-. 4.9. Metodología para la determinación de profundidad máxima y área de desgaste. a) La línea roja indica la zona donde se obtienen las imágenes topográficas, b) perfil promedio obtenido a partir de las imágenes topográficas donde se analiza la profundidad máxima del perfil y el área de desgaste (en rojo)

- ✓ Graficar los valores obtenidos de profundidad media vs número de piezas.

• Punzón

En el punzón se diferencian dos partes. La plana, que es la encargada de dar la morfología a la pieza y la que posee los dos orificios donde se introducen los pines del noyo y la cilíndrica, que es el cuerpo del punzón y que forma par tribológico con la matriz.

La zona plana es la que está en contacto con las cotas críticas y se realiza su análisis en punzones ya retirados de la producción. La morfología de la zona no permite obtener réplicas óptimas de la superficie imposibilitando el análisis de la evolución de las cotas críticas en función del número de piezas. Sin embargo, se estima su dimensión mediante la huella que dejan en las piezas una vez compactadas y sinterizadas.



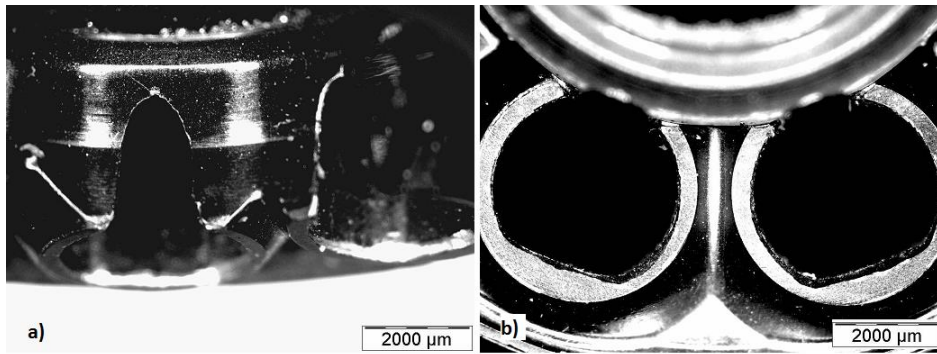


Figura.- 4.10. Imágenes del punzón relacionadas con las cotas críticas de la pieza: a) Pestaña con fractura en la parte superior del arco, b) Detalle de los agujeros del punzón.

De la zona cilíndrica exterior, se estudia la evolución de los mecanismos de desgaste observados mediante la obtención de réplicas de la superficie a lo largo de la vida en servicio de la herramienta.

4.5 Material del punzón y del noyo (HSS)

4.5.1 Material base

Los aceros rápidos o HSS (High Speed Steels) son aceros de gran aleación y usados en aplicaciones donde se requiere alta resistencia al desgaste. Estos aceros se podrían considerar como un composite puesto que los carburos primarios, de 1 - 10 μm de diámetro, están dispersas en una matriz martensítica que contiene una muy fina dispersión de carburos secundarios (<100 μm de diámetro). Los carburos secundarios proveen a la matriz martensítica un endurecimiento por precipitación. Los carburos primarios sin embargo, mayoritariamente del tipo MC y MC₆, son más duros que la matriz (1500 – 2800 HV) y son los que permiten una gran resistencia al desgaste a estos aceros [10].

El ASP2012 está compuesto por una matriz base hierro y tiene una homogénea y fina dispersión de carburos de cromo y tungsteno que confieren a la aleación una combinación muy buena de propiedades tales como alta resistencia mecánica, resistencia al desgaste, resistencia al impacto, dureza en caliente y resistencia al temple.

Las herramientas analizadas en este proyecto están mecanizadas en HSS, en concreto la denominación comercial utilizada para el material escogido es ASP2012. El acero ASP2012 se puede encontrar también en aplicaciones como:

- Engranajes de caja de cambio
- Herramientas para trabajo en frío y caliente.



A continuación se muestra la microestructura de estos aceros y su composición:

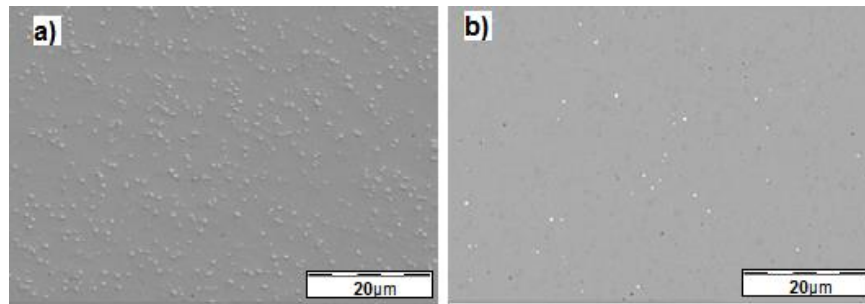


Figura.- 4.11. Imagen de la microestructura del acero ASP2012: a) MEB electrones secundarios; b) MEB electrones retrodispersados. Carburos con mayor porcentaje de Vanadio (oscuros) y de mayor porcentaje de Tungsteno, Cromo, Hierro y Molibdeno (claros).

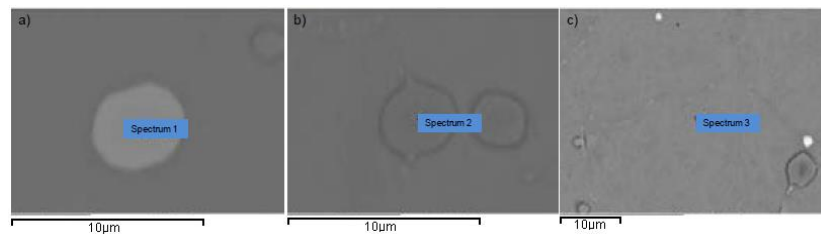


Figura.- 4.12. Imagen de la zona donde se ha medido la composición química del acero ASP2012: a) carburo claro; b) carburo oscura y c) matriz metálica.

Spectrum		V	Cr	Fe	Mo	W	Si
1	Carburo	2,05	8,43	31,39	20,72	32,93	-
2	Carburo	61,99	-	-	11,00	15,21	-
3	Matriz	-	7,47	91,55	-	-	0,98

Figura.- 4.13. Composición química de cada uno de los espectros analizados en % en peso.

4.5.2 Recubrimiento de alta dureza (TiAlN)

En la actualidad existen tratamientos térmicos y superficiales que optimizan ampliamente los procesos industriales permitiendo una mayor velocidad de producción con un mínimo desgaste. El hecho de recubrir la herramienta con una capa micrométrica con otro material con mejores propiedades, permite una mejora en el comportamiento tanto a desgaste como fricción incrementando la vida en servicio de la herramienta, también se reduce la necesidad de lubricante e incrementa la velocidad de producción. En contrapartida, se puede producir el desconche (chipping) del recubrimiento cambiando las tolerancias de la pieza, dejando sueltas a su vez partículas duras de recubrimiento las cuales pueden producir desgaste abrasivo por tercer cuerpo y lo más importante: se eleva el coste individual de la herramienta.



En este proyecto los punzones analizados están recubiertos con el recubrimiento comercial BALINIT® FUTURA NANO el cual es un recubrimiento de AlTiN a base de multicapas nanométricas depositadas por el método de PVD (*Physical Vapor Deposition*). Algunas de las propiedades de este recubrimiento se muestran en la Figura 4.14:

Material de recubrimiento	Microdureza [HV 0.05]	Espesores según proveedor [μm]	Coefficiente de fricción contra acero (seco)	Temperatura máxima de servicio [°C]	Color del recubrimiento
AlTiN	3300	2 – 4	0.30 - 0.35	900	violeta-gris

Figura.- 4.14. Propiedades del recubrimiento Balinit Futura Nano [BALZ]

El recubrimiento BALINIT® FUTURA NANO esta especialmente diseñado para aplicarse en herramientas diseñadas para mecanizado en seco y/o sometidas a grandes esfuerzos, también son solventados requerimientos de gran elevada resistencia al desgaste tanto abrasivo como adhesivo. Algunos ejemplos de aplicación pueden ser: engranajes de coches herramientas HSS (taladrado, torneado...), componentes para moldeado de plástico.

4.6 Caracterización del polvo de sinterizado

Con la finalidad de analizar la influencia del polvo en los mecanismos de desgaste que ocurren en nuestro proceso, se lleva a cabo un análisis del polvo de sinterizado utilizado en el proceso productivo. Dicho análisis se lleva a cabo con la ayuda de imágenes tomadas por SEM y espectrografías por EDX y se compone de:

- Estudio morfológico: para saber si las partículas tienden a la esfericidad o sin embargo contienen cantos agudos
- Estudio estadístico visual para cuantificar cuantas partículas se tienen en cada rango de tamaños. El criterio para determinar el tamaño de la partícula se define como el diámetro que circunscribe la longitud máxima visible de la partícula (Figura 4.15 c)).

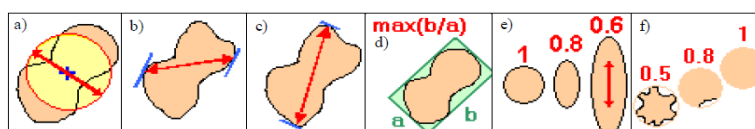


Figura.- 4.15. Posibles parámetros a estudiar mediante análisis de imagen: a) diámetro equivalente (ECD); b) diámetro mínimo (Dmin); c) diámetro máximo (Dmax); d) relación de aspecto; e) esfericidad (ψ) y f) factor de forma. [TECNUN]

- Espectrografía para saber cualitativamente y semicuantitativamente los materiales que lo componen.



4.7 Obtención de réplicas de silicona

Los mecanismos de desgaste son fenómenos dinámicos. Esto quiere decir que están muy relacionados con el número de ciclos sufridos en servicio igual que con las condiciones tanto de tensiones como del medio que pudieran sufrir. Cuando se analiza un fenómeno de desgaste se tiene que observar cual es el origen, como se inicia, como evoluciona, si aparecen otros fenómenos y como llega a dejar inservible la herramienta en cuestión. Ahora, si sumamos esta necesidad de análisis continuo a que las herramientas están en un proceso de producción en serie, nos damos cuenta de la inviabilidad de llevarnos las herramientas al centro de investigación cada vez que queramos analizar los fenómenos de desgaste en función del número de ciclos. Este problema se resuelve con la obtención de réplicas de la superficie mediante silicona de vinilpolisiloxano (también conocida como material de impresión VPS). Compuesta por dos componentes que se mezclan mediante un aplicador y se aplican sobre la superficie de la herramienta a estudiar, nos permite observar la réplica de la superficie con una resolución de $0,1\text{ }\mu\text{m}$ (según proveedor). Dichas réplicas también nos permiten el análisis de la profundidad y morfología de los defectos mediante microscopía confocal, así como mediciones de los parámetros de rugosidad lineal y/o superficial.

En la Figura 4.16 a) que se muestra a continuación, se observa un ejemplo de aplicación de la silicona (de color verde) sobre una de las herramientas analizadas, en concreto un noyo. Una vez curada la resina, se solidifica y copia, en negativo, la superficie, obteniendo la réplica la cual permite hacer los diferentes análisis sin necesidad de la herramienta.

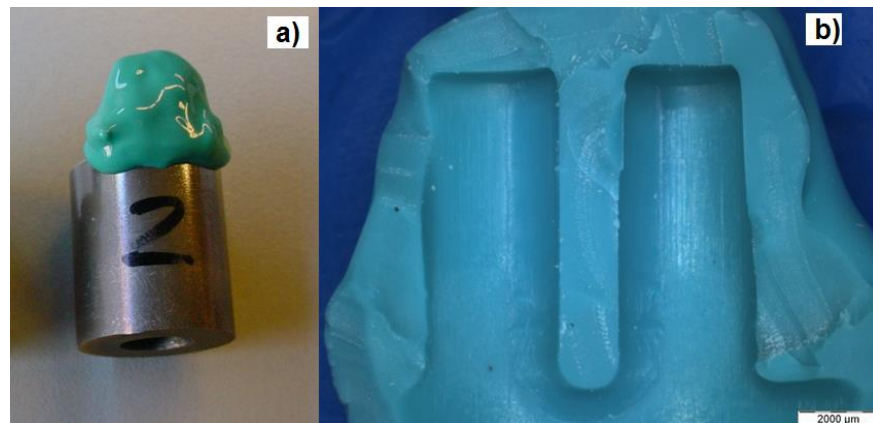


Figura. - 4.16. a) Aplicación del material de impresión sobre noyo. b) Réplica obtenida y preparada para ser visualizada.



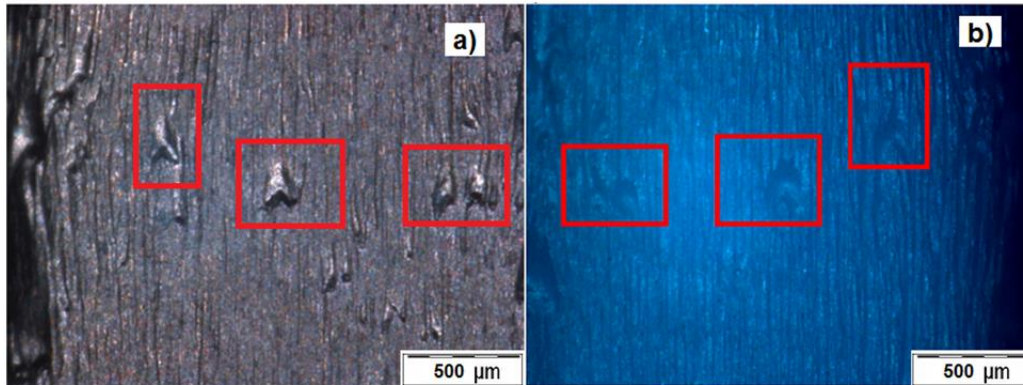


Figura.- 4.17.a) y b) Defectos observados mediante lupa de la misma zona de la herramienta y de la réplica, respectivamente.

Como se ha mencionado, las réplicas también permiten ser analizadas mediante microscopía confocal. La microscopía confocal permite reproducir la superficie en 3D y en 2D y mediante un software para dicha misión, se pueden obtener tanto perfiles como parámetros de rugosidad.

Se debe tener en cuenta que la réplica es una copia en negativo de la superficie por lo que se deberá tratar la imagen con un efecto espejo en el eje “z” para la posterior comparación. El ejemplo se muestra en la Figura 4.18.

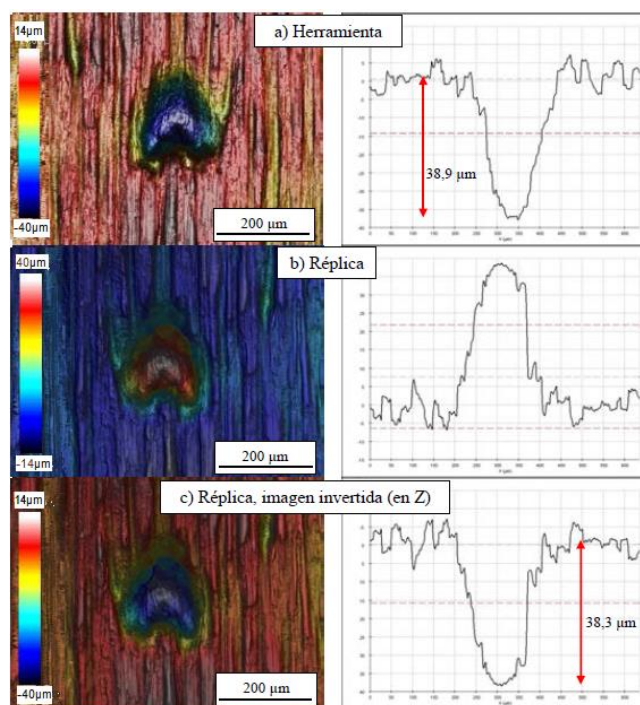


Figura.- 4.18. Imágenes obtenidas mediante microscopía óptica confocal: a) Defecto hallado en la herramienta, b) Réplica en negativo obtenida con material VPS (silicona) y c) Tratamiento de la imagen con efecto espejo en el eje “z” para la reproducción del defecto a partir del negativo de la réplica.



Para la calibración de la silicona, se ha procedido a realizar, mediante microscopía óptica confocal, mediciones de defectos puntuales en la herramienta para la posterior comparación de la magnitud y morfología del mismo defecto en el material de impresión. La relevancia de este hecho es estimar la precisión real del material de impresión. El proveedor la fija en $0,1\text{ }\mu\text{m}$ pero se debe de verificar, sobre todo en el rango de la decima de micra.

A continuación se muestran uno de los defectos, en este caso de adhesión, en el rango de las micras. Ambas imágenes están tomadas a 500x y tienen la misma escala. Como se observa en la Figura 4.19 a) La imagen de la herramienta sobresale del plano superficial de la herramienta mientras que en la Figura 4.19 b) El defecto se embebe en su interior.

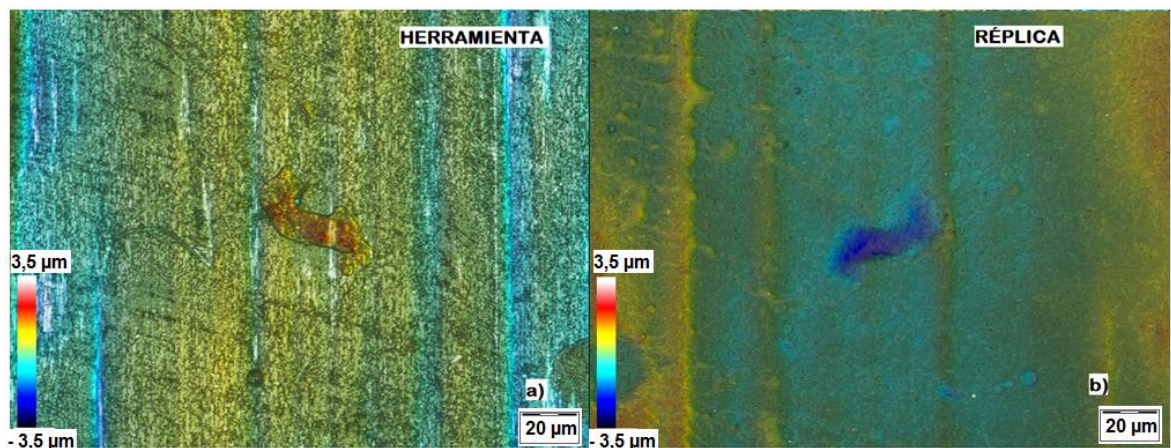


Figura.- 4.19. Microscopía óptica confocal a 200x de: a) Defecto de adhesión hallado en la herramienta, b) La réplica del defecto en el material de impresión VPS.

El análisis de la imagen se realiza mediante el programa SensoMap. Dicho software permite, entre otras, la extracción de perfiles.

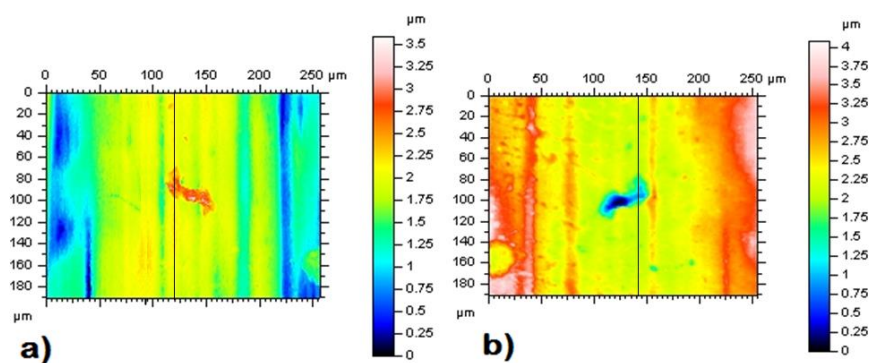


Figura.- 4. 20. Imagen obtenida mediante SensoMap: a) En la herramienta; b) En el material de impresión. En negro se muestra la posición del perfil extraído.



Y a continuación se muestra el perfil concreto obtenido en cada caso. La selección del perfil se hace manualmente intentando aproximar al máximo la ubicación del mismo para cada imagen. En la Figura 4.20 a) Se señala la posición del perfil escogido.

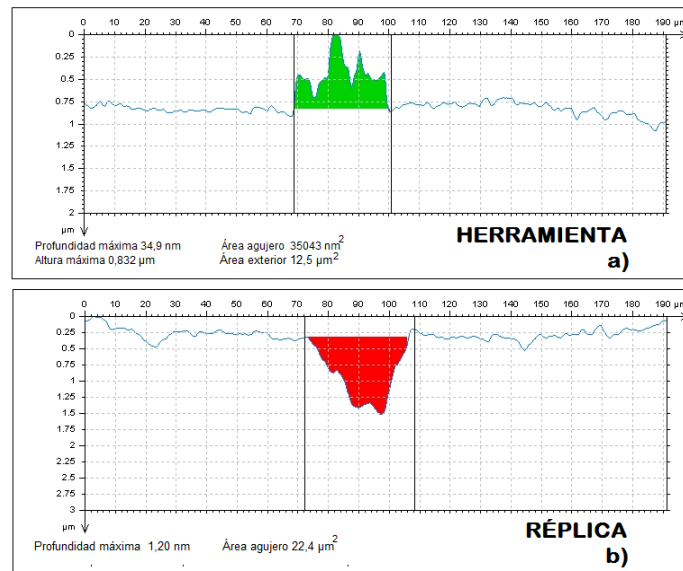


Figura.- 4. 21. Perfil vertical concreto de a) La herramienta b) La réplica. En la misma posición relativa al defecto.

Estos perfiles nos permiten ver la morfología de los defectos puntuales y mediante una opción del programa, medir sus áreas, profundidades, etc. Magnitudes que se ven en la parte inferior de las gráficas y que son las graficadas en el apartado de resultados. Como el defecto es de adhesión, en la herramienta se mide la altura del defecto mientras que en la réplica la profundidad. En este caso no se ha hecho el negativo de la réplica para visualizar el resultado obtenido directo de la réplica.

Se observa que la morfología del defecto no es idéntica. En el apartado de resultados se discuten las razones que conllevan a la diferencia entre los resultados obtenidos directamente en mediciones realizadas en la herramienta y en el material de impresión VPS.

El proceso de análisis, una vez obtenidas las réplicas de las superficies, ha consistido en lo siguiente:

1. Preparación de las réplicas para poder ser observadas mediante técnicas de microscopía óptica confocal y lupa. A veces, la morfología final de las réplicas, las protuberancias de la silicona, etc. no permitían poder enfocar el punto a analizar por la imposibilidad de acercamiento de la óptica. Como solución se opta por cortar con bisturí las zonas que molestan intentando dejar una de las réplicas siempre sin tocar, como seguro para nuevos estudios.
2. Observación mediante lupa de la situación de defectos y de la superficie dañada. Búsqueda de poros en la superficie generados por una incorrecta aplicación del material de réplica VPS.



3. Toma de imágenes de las zonas a estudiar mediante microscopía confocal:
 - ✓ Para análisis de defectos puntuales. Dimensión de los defectos.
 - ✓ Para análisis mediante el software SensoMap de los parámetros de rugosidad superficial referidos en la normativa ISO 25178 [11].
4. Comparación de las observaciones en función del número de piezas asumido por la herramienta en cuestión.

4.8 Diseño de ensayos tribológicos

En este apartado se explican todos los puntos para poder reproducir la puesta a punto de los ensayos de abrasión y desgaste. Se han utilizado equipos que permiten la recreación de condiciones similares a los fenómenos de abrasión y desgaste existentes en diferentes procesos industriales. Si bien no son una copia exacta de lo que les sucede a las herramientas en “servicio”, si que permiten la comparación entre materiales frente unas mismas condiciones.

4.8.1 Ensayo: Pin on disk

La finalidad del ensayo Pin on disk es la estimación y evolución del coeficiente de fricción de dos materiales. Para ello se requiere de dos especímenes, por un lado el Pin (en este caso con punta semi-esférica) y que se coloca en contacto y en posición vertical al otro espécimen, el disco.

El ensayo consiste en un movimiento relativo circular de uno sobre el otro a la vez que se aplica una carga. Hay tribómetros de ensayo donde se mueve el pin y otras, como es el caso del utilizado, donde el que gira es el disco.

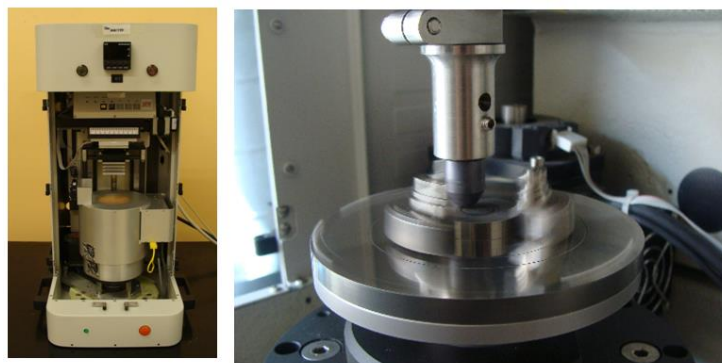


Figura.- 4.22. A la izquierda, fotografía del tribómetro de ensayo de Pin on disk utilizado, a la derecha, imagen del pin en contacto con el disco en rotación.



El resultado del ensayo se obtiene graficando la evolución del coeficiente de fricción en relación a la distancia, tiempo o número de ciclos. El coeficiente de fricción se calcula a través de la lectura de la fuerza normal y tangencial que percibe el pin mediante unas galgas extensiométricas para dicha misión. Durante la realización del ensayo ocurren transiciones en los mecanismos de fricción que originan cambios en las condiciones de acoplamiento entre superficies. A su vez se puede observar la diferencia en la morfología de las superficies (medición de la evolución de las pistas de desgaste), en las dimensiones (midiendo cuidadosamente antes y después del ensayo) y en el volumen de material removido y/o transferido de un espécimen a otro.

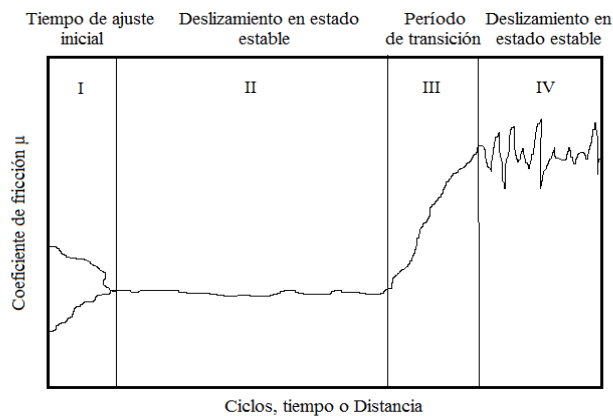


Figura.- 4.23. Curva típica del coeficiente de fricción μ en función de los ciclos, tiempo o distancia recorrida.

La normativa que rige este tipo de ensayos es la ASTM G99 – 05 [3]. Y el tribómetro utilizado es *MM/159 Tribòmetre CETR UMT-2* y su manipulación se ha llevado a cabo mediante el software CETR.

4.8.1.1 Material y probetas

Para los ensayos de “Pin on disk”, se dispone del siguiente material:

- 18 pines de material ASP2012 de dureza 60-62 HRC de los cuales 9 tienen el recubrimiento Balinit Futura Nano. El acabado superficial se demanda igual que el de la herramienta.

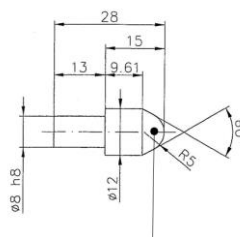


Figura.- 4.24. Dimensiones de los pines.



- 45 discos en verde, de polvo del proceso de sinterizado prensados, a diferentes densidades:
 - 15 discos a $\rho = 6,8 \text{ g/cm}^3$
 - 15 discos a $\rho = 7 \text{ g/cm}^3$
 - 15 discos a $\rho = 7,1 \text{ g/cm}^3$

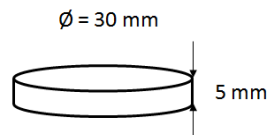


Figura.- 4.25. Dimensiones de los discos en verde.

Por las dimensiones de los pines y de los discos, el radio de giro del pin debe de ser de 4 milímetros.

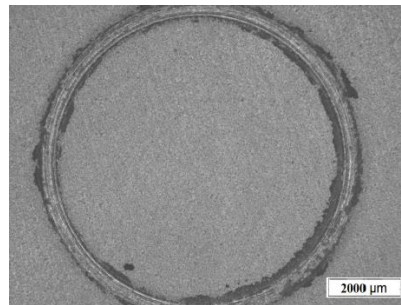


Figura.- 4.26. Huella tomada mediante lupa a 6,3x de la huella que produce el pin en el disco.

La puesta a punto pretende determinar la magnitud de parámetros como:

- La velocidad angular de giro del disco [rpm].
- La carga [N].
- La densidad del disco óptima.
- Distancia o duración del ensayo.

4.8.2 Ensayo: Rubber Wheel Abrasion Test

La máquina para ensayos de abrasión Rubber Wheel Abrasion Tester es una máquina muy utilizada en las industrias relacionadas con el petróleo, la minería, agricultura, así como en laboratorios, para analizar las resistencia al desgaste de diferentes materiales para poder hacer una correcta selección de los mismos en condiciones de abrasión para bajas tensiones.





Figura.- 4.27. Vista general del equipo empleado para los ensayos RWAT (marca DEIMA, modelo 2005).

Este tipo de ensayo permite observar una buena relación entre los experimentos de laboratorio y los fenómenos observados en las herramientas durante el servicio. El RWAT está regido por la normativa ASTM G65 [4] la cual estandariza el ensayo. El RWAT se suele realizar bajo una carga y una velocidad constante para todos los materiales, el abrasivo de tamaño y morfología conocidos, es introducido entre la rueda de goma en rotación y la muestra a ensayar produciendo el desgaste por tercer cuerpo con un movimiento relativo a la muestra paralelo al de la rueda. [12]

En la Figura 4.28 se muestra un esquema de un Rubber Wheel Abrasion Tester. Sus partes principales se especifican a continuación:

- Hopper: Es el depósito de arena o polvo. Dicha arena es la que se utiliza como tercer cuerpo y causa la abrasión. Para el correcto flujo de las partículas, tiene instalado un elemento vibratorio que asegura el flujo removiendo el polvo para que no se quede estático.
- Boquilla: Del Hopper, la arena es reconducida hacia la rueda o hacia la muestra a ensayar mediante unos conductos que acaban en una boquilla.
- Rueda: Puede ser de goma, de acero o de neopreno según las condiciones que se quieran recrear.
- Porta espécimen: Donde se coloca la muestra a ensayar.
- Peso: La carga se coloca a un extremo de un brazo articulado que mediante una palanca transmite la carga a la muestra.



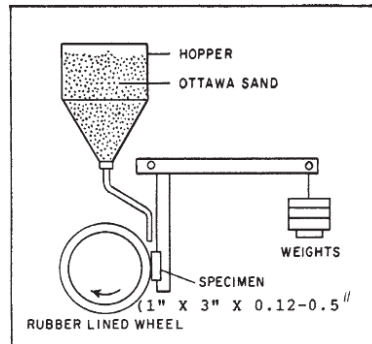


Figura.- 4.28. Esquema de la máquina de ensayo Rubber Wheel Abrasion Test o RWAT [4].

Los resultados de los ensayos se pueden ver influenciados por la carga aplicada, la velocidad y propiedades de la rueda, el tamaño del abrasivo, etc. La finalidad de este ensayo es permitir analizar qué cambios suceden en la superficie de la muestra, la diferencia de volumen de material antes y después del ensayo en función de las condiciones de éste, la temperatura de la muestra a lo largo del ensayo y el coeficiente de fricción del par tribológico gracias a que calcula la fuerza normal y tangencial a la muestra mediante unas galgas extensiométricas instaladas para tal caso.

Para el análisis de los resultados, la normativa ASTM G65-04 ("Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus") [4] propone graficar el volumen desgastado vs. distancia de deslizamiento (abrasión lineal). El volumen desgastado se calcula a partir de las pesadas de las probetas en cada parada empleando una balanza analítica y dividiendo por la densidad del material. Los valores obtenidos que sirven para la posterior comparación son:

- Tasa de desgaste K [$\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-1}$]: Valor de la pendiente de la gráfica de volumen de desgaste vs. distancia de deslizamiento.
- Tasa específica de desgaste K_e [$\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$]: Tasa de desgaste dividida por la carga normal aplicada.

Al final del ensayo, la probeta muestra una morfología superficial similar a la presentada en la Figura 4.29.



Figura.- 4.29. Huella obtenida después de un ensayo de RWAT.



4.8.2.1 Material y probetas

Para los ensayos de desgaste abrasivo RWAT, se dispone del siguiente material:

- ✓ 6 probetas de dimensiones 79 x 25 x 10 mm, 3 son de material ASP2012 y las otras 3 están mecanizadas en acero ASP2012 pero llevan el recubrimiento Futura de AlTiN. El acabado superficial se demanda igual al de las herramientas.

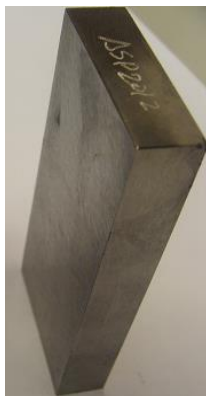


Figura.- 4.30. Probeta para ensayos RWAT de ASP2012.

- ✓ 150 kg. del polvo base hierro y con partículas de trifosfuro. El mismo que el utilizado en el proceso de sinterizado.

Los parámetros que se han mantenido constantes a lo largo de todos los ensayos se muestran en la Figura 4. 31.

Parámetro	Valor	Observaciones
Tipo de rueda	Disco de acero recubierto con caucho	Según norma ASTM G65-04 [4]
Diámetro de la rueda (mm)	228	-----
Ancho de la rueda (mm)	13	-----
Dureza de la rueda (Shore A)	60	Valor certificado por el proveedor
Tipo de Abrasivo	Fe + 3P	
Flujo de abrasivo (g/min)	840 ± 20	-----

Figura.- 4.31. Tabla de parámetros constantes a lo largo de todos los ensayos RWAT efectuados.



La puesta a punto pretende determinar la magnitud del resto de parámetros como:

- ✓ La velocidad angular de giro de la rueda [rpm].
- ✓ La carga [N].
- ✓ La cantidad de polvo a utilizar por pasada.
- ✓ La cantidad de pasadas que se hace pasar el mismo polvo.
- ✓ La cantidad de pasadas de polvo por ensayo.

4.9 Caracterización superficial de las herramientas, réplicas y muestras de ensayos tribológicos

4.9.1 Lupa

El análisis óptico de las superficies de las herramientas y réplicas, igual que la toma de las imágenes de las pistas de desgaste en RWAT como de los pines ensayados, se ha llevado a cabo mediante una lupa estereoscópica (OLYMPUS SZX10) El tratamiento de las imágenes se ha efectuado mediante el software *analySIS auto*.

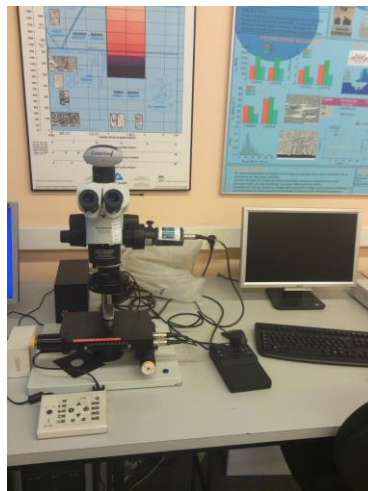


Figura.- 4.32. Imagen de la lupa óptica utilizada.

4.9.2 Microscopía confocal y microscopía electrónica de barrido (SEM)

El análisis de las superficies tanto de las herramientas desgastadas y sus réplicas, como de las probetas ensayadas, ha consistido en la toma de imágenes que han permitido observar los



mecanismos de desgaste existentes. La toma de las imágenes hasta 1500x se ha realizado mediante el microscopio confocal modelo *SensofarPLμ 2300*.

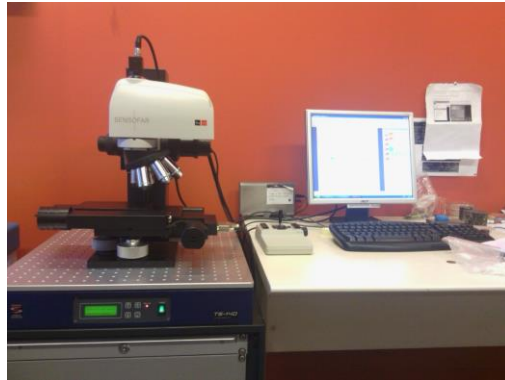


Figura.- 4.33 Microscopio confocal modelo SensofarPLμ 2300

La manipulación y obtención de las imágenes mediante el software *SensoScan*.

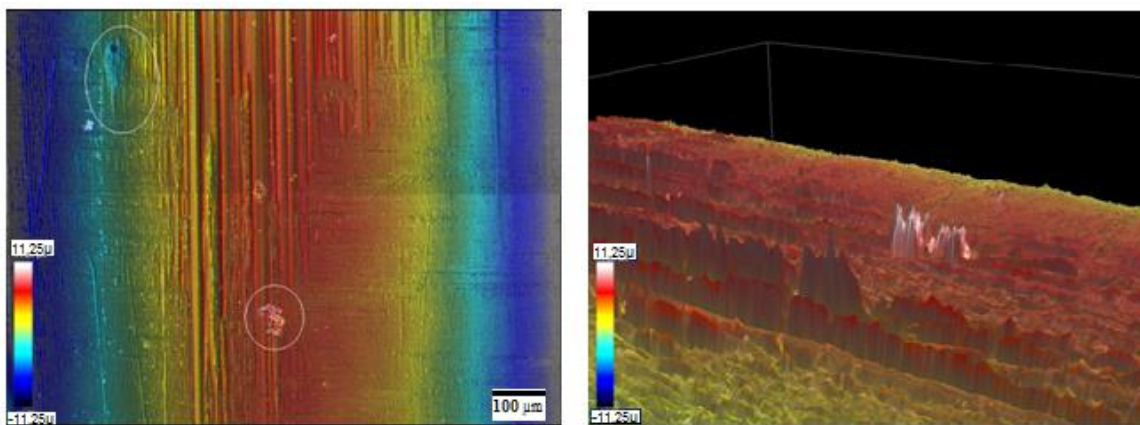


Figura.- 4.34. Imágenes en 2D y 3D respectivamente de un mismo defecto, obtenidas mediante microscopía confocal y tratadas con *SensoScan*.

Y el tratamiento posterior de las imágenes para la obtención de los parámetros de rugosidad tanto lineal como superficial bajo normativa ISO 25178 [11] se ha efectuado mediante el software *SensoMap*. Los parámetros analizados se muestran y definen en la siguiente figura.



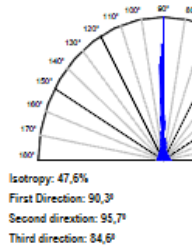
Parámetros de amplitud 3D		
Parámetro	Denominación	Definición
S_a	Rugosidad promedio	
S_q	Rugosidad media cuadrada (RMS)	
S_p	Altura máxima	Altura de pico máxima de un área definida
S_v	Profundidad máxima	Profundidad de valle máxima de un área definida
S_z	Altura máxima total	Suma de la altura del pico más alto y del valle más profundo de un área definida
Parámetros 3D para el análisis espectral de superficies		
S_{tr}	Razón de proporcionalidad de la textura	<p>Es una medida de la direccionalidad de la textura superficial. Para superficies con una direccionalidad predominante el parámetro S_{tr} tiende a 0, mientras que superficies isotrópicamente ideales tienen un valor de 1.</p> <p>Ejemplo medida del ángulo de dirección de textura:</p>  <p>Isotropy: 47,6% First Direction: 90,3° Second direction: 95,7° Third direction: 84,6°</p>
Parámetros híbridos		
S_{dr}	Razón de área desarrollada	Se expresa como el porcentaje de superficie adicional favorecido por la textura cuando se compara con la superficie plana ideal de la región de medida

Figura.- 4.35. Parámetros de rugosidad superficial analizados bajo normativa ISO 25178 [11].

Cuando se ha requerido de más aumentos, la toma de imágenes se ha efectuado mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM) de alta resolución (hasta $10^6\times$) modelo ZeissUltra plus mostrado en la Figura 4.36.

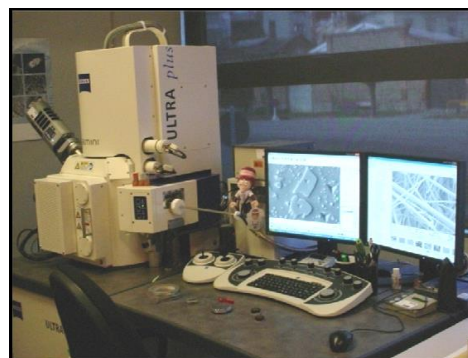


Figura.- 4.36. Imagen del microscopio de alta resolución SEM.



Mediante SEM se ha podido analizar, por ejemplo, el comportamiento de los carburos, la existencia de microgotas generadas durante el recubrimiento por PVD, la morfología de microdefectos como microgrietas, adhesiones, etc.

Cuando se ha requerido del análisis de la composición química de algún material, se ha utilizado la técnica EDX o EDS, la cual es una técnica analítica utilizada conjuntamente con el SEM para la caracterización química semicuantitativa y cualitativa de una muestra. Ésta consiste en aplicar un haz de energía muy potente, formado por electrones, sobre la zona a analizar. Dicha energía excita los electrones los cuales al volver al estado de reposo emiten un Rayo X el cual es único para cada material.

La técnica EDX se ha utilizado, entre otras cosas, para la caracterización de los polvos de sinterizado. El resultado es una espectrografía la cual marca con picos las valores de energía asociados a los materiales presentes en la zona donde se ha realizado el análisis (ver Figura 4.37). También se puede obtener un “mapping” de la situación de cada material.

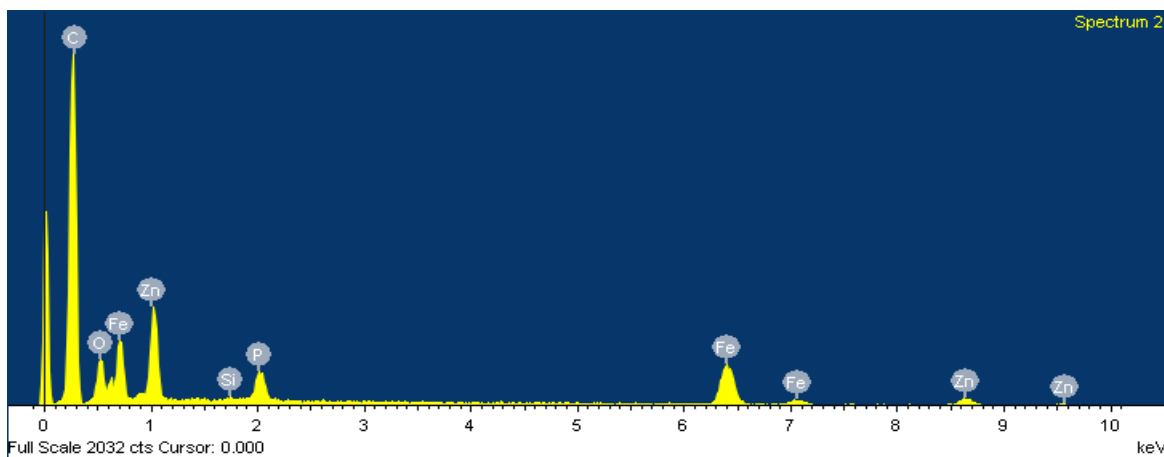


Figura.- 4.37. Ejemplo de la espectrografía generada mediante EDX.



5. RESULTADOS

Se ha llevado a cabo el análisis de los mecanismos de desgaste existentes en las herramientas de un proceso de producción por sinterizado. La metodología ha consistido en, inicialmente, analizar herramientas ya retiradas de la producción para identificar los mecanismos de desgaste existentes, y una vez definidos los mecanismos observables y estudiables, un seguimiento de los mismos durante la vida en servicio de herramientas nuevas para acabar con el diseño de ensayos tribológicos que reproduzcan los mecanismos de desgaste observados. Para ello, primero se ha tenido que calibrar el material de impresión y analizar las características tanto morfológicas como químicas del polvo de sinterizado.

5.1 Calibración de la silicona en la toma de réplicas

Se ha realizado una comparación entre las dimensiones obtenidas en los defectos hallados en las herramientas y sus respectivas réplicas. Para ello, se ha tomado una imagen mediante microscopía óptica confocal a 500x o a 1500x de cada defecto y de su réplica y mediante el programa SensoMap se ha obtenido el perfil de la topografía. Se ha optado por obtener un perfil singular de cada defecto intentando que ambos perfiles involucrados en la comparación resultaran estar en la misma ubicación respecto al defecto. En total se han comparado 17 defectos de diferentes rangos de tamaño, desde las décimas de micra a las decenas de micras. En la siguiente imagen se observa uno de los defectos analizados.

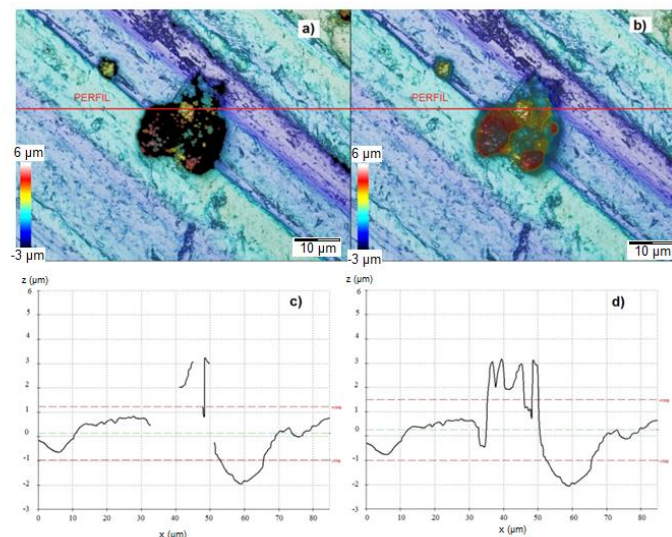


Figura.- 5.1. a) y b) Imagen tomada 1500x mediante microscopía óptica confocal de un defecto de adhesión en probeta de RWAT (*Rubber Wheel Abrasion Test*). En a) y en negro se observan las zonas con ausencia de información, en b) se han restaurado los puntos sin información mediante el programa de toma de imágenes SensoScan. c) y d) son los perfiles obtenidos respectivamente en cada una de las imágenes.



En rojo se muestra la ubicación del perfil obtenido. Resaltar que se hallan puntos con ausencia de información según la morfología del defecto, por ejemplo, cuando hay zonas perpendiculares al foco de la luz, ésta no se refleja correctamente y aparecen puntos con ausencia de información. Estos se muestran en negro en las imágenes, para resolver este problema, el programa SensoScan hace una estimación de la altura de los puntos en función de sus vecinos. A este proceso se le llama Restauración de la imagen. La imagen no restaurada se muestra en la Figura 5.1 a) y la restaurada en la Figura 5.1 b).

El resultado se refleja en el siguiente gráfico, donde se pueden ver los valores obtenidos de altura máxima de defecto en la herramienta (columna izquierda) y en la réplica (columna derecha).

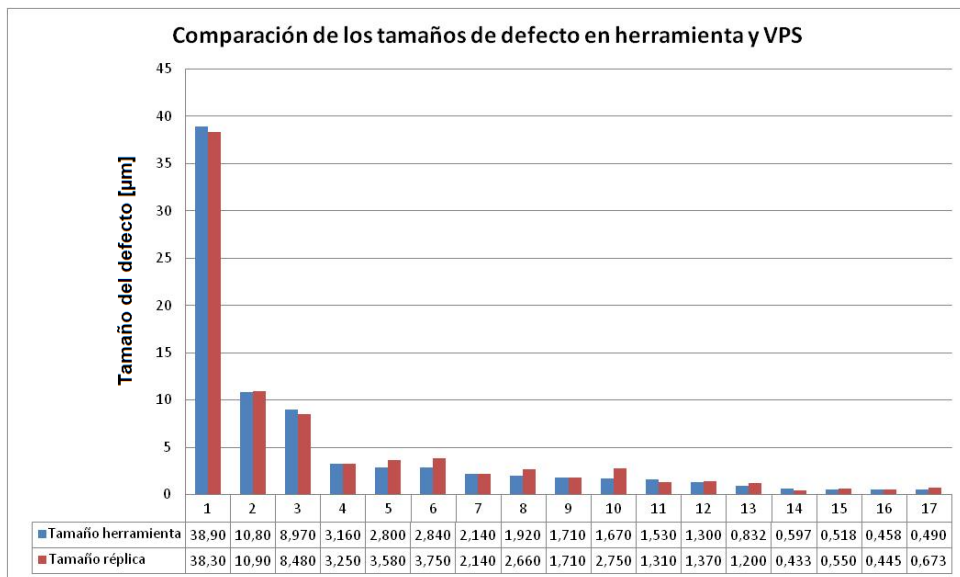


Figura.- 5.2. Comparación de magnitud en cota “z” de defectos en herramienta y en réplica.

La diferencia media entre los valores es de 0,324 μm . Se hallan 7 mediciones donde la diferencia está por debajo de la décima de micra. Y dos copian exactamente la medición. Tras estos resultados se concluye que la técnica de la obtención de réplicas por material de impresión VPS sí que permite la reproducción de defectos de escala micrométrica, además, ya hay estudios que lo analizan con resultados satisfactorios [1, 2], en estos estudios se llega a conclusiones similares respecto a las limitaciones de la técnica:

- ✓ El método manual de obtención de perfiles mediante software dificulta la copia exacta de la posición de la toma del perfil y genera que no sea exactamente el mismo perfil analizado el de la herramienta y el de la réplica.
- ✓ El tratamiento de la imagen a la hora de nivelar las superficies puede hacer que la cota de referencia no sea exactamente la misma para ambos perfiles.



- ✓ Las limitaciones por parte del microscopio confocal de reproducir superficies con morfologías muy irregulares por el hecho que la luz no se refleje correctamente, acarrearán diferencias en las mediciones.
- ✓ La precisión del material de impresión según fabricante es de 0,1 μm .

5.2 Caracterización del polvo de sinterizado

En la Figura 5.3 se muestran las imágenes del polvo del proceso analizado a diferentes aumentos. Las imágenes a 100 aumentos se han utilizado para el recuento de partículas con la intención de discernir qué tipo de partículas lo componen: tamaño, morfología y material.

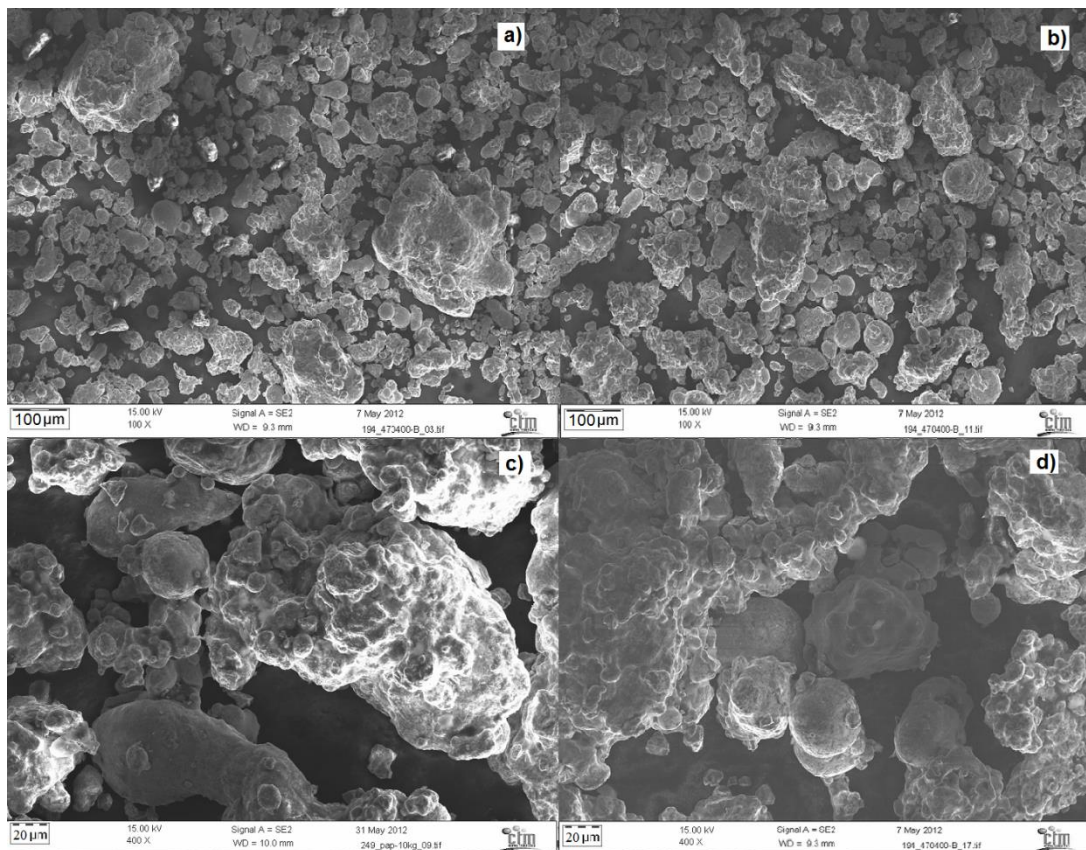


Figura.- 5.3. a) b) Imágenes del polvo analizado a 100x; c) y d) Imágenes del mismo polvo pero a 400x.

El análisis morfológico basado en la Figura 5.3 a), permite las siguientes conclusiones:

- 1) Se hace una estimación de que en la imagen a) se hallan unas 220 partículas de las cuales se cuentan unas 21 partículas con morfología esférica. Por lo



que se puede decir que tenemos un 10% de partículas de forma esférica. El tamaño de las cuales está en el 90% de los casos por debajo de 50 μm .

2) El resto de partículas tiene morfología desigual con muchos cantos redondeados y ángulos por encima de 90°. La morfología de las partículas depende del proceso mediante el cual han sido generadas. Diferentes procesos como atomizados en argón, aire o agua, molidos, escamación por temple en agua, dan diferentes morfologías de partículas. En nuestro caso se estima que ha sido producido por atomización. Un ejemplo de polvo base hierro y atomizado se muestra a continuación

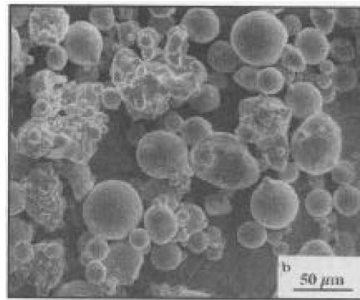


Figura.- 5.4. Aleación de Fe atomizada en Argón. [TECNUN]

3) Se estima mediante un recuento visual y definiendo como dimensión representativa para valorar el tamaño de partícula la longitud máxima visible, que:

- ✓ Entorno al 50% de partículas < 50 μm del cual un 20% son <10 μm
- ✓ Un 40% de partículas 50 < X < 100 μm
- ✓ Un 10% de partículas 100 < X < 300 μm

4) En el proceso analizado se está utilizando un polvo base hierro con partículas de trifosfuro mezclado con una resina de estearato de zinc que hace de lubricante durante el compactado. Esta resina es eliminada durante el proceso de sinterización. El análisis de la composición vía EDX (Figura 5.6) de la zona marcada como Spectrum 2 en la Figura 5.5 muestra la composición cualitativamente de los diferentes componentes que forman el polvo.



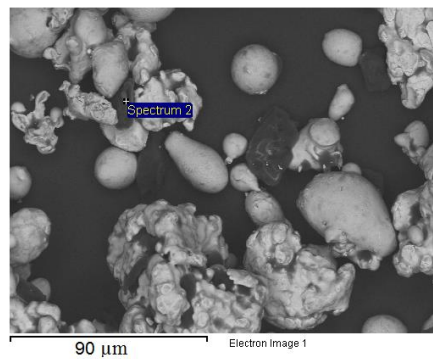


Figura.- 5.5. Imagen SEM a 400x del polvo de sinterizado.

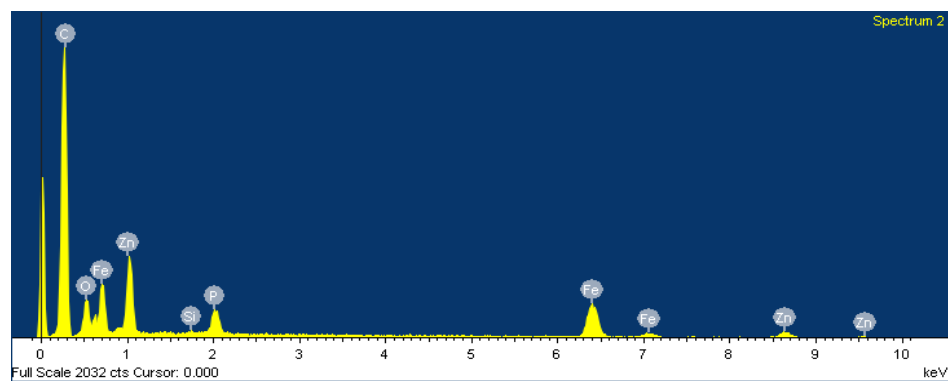


Figura.- 5.6. Espectro generado mediante análisis por EDX. Se muestra la composición de la muestra cualitativamente y semicuantitativamente.

Se observa hierro y fósforo de las partículas y zinc y carbono de la resina que actúa de lubricante. Por el tamaño de los picos, las zonas en oscuro definimos que son la resina de estearato de zinc y en gris claro se muestran las partículas base hierro y los fosfuros. También se observa como hace de aglutinador de partículas. La espectrografía sobre el punto denominado como "Spectrum 5" hace referencia a una de las partículas compuesta por fosfuros.

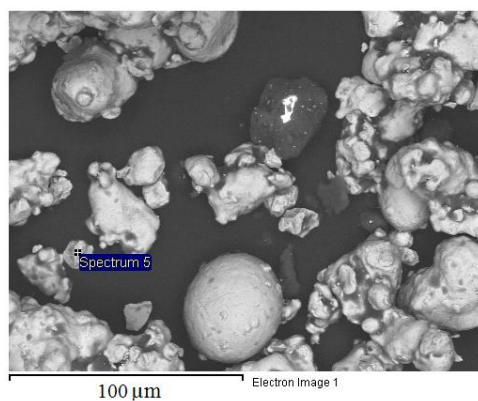


Figura.- 5.7. Imagen SEM a 400x del polvo de sinterizado.



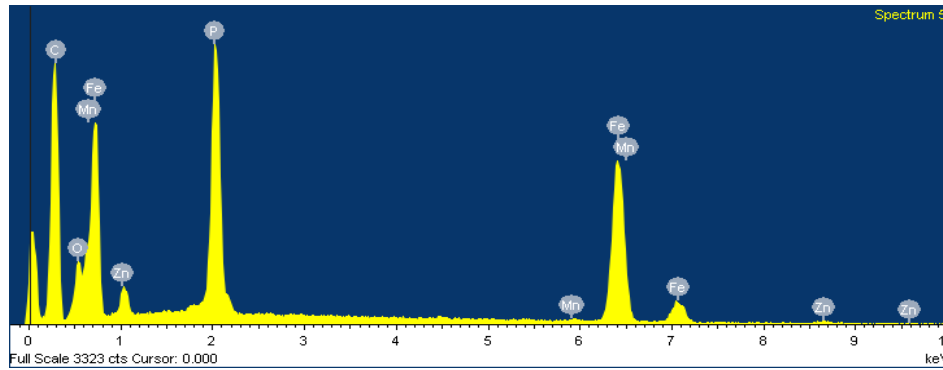


Figura.- 5.8. Espectrografía del “Spectrum 5”.

Las partículas de fosforo presentan morfologías más anguladas que las de base hierro. Esto puede ser debido al proceso de producción de las mismas (por ejemplo, que se produzcan mediante el método de molido), también que sean un material más duro o ambas. A su vez se determina que el rango de tamaño de las partículas base fósforo están entre las 5 y las 20 μm .

A continuación se muestra un análisis químico de la cantidad de material que hay según composición. El espectro analizado es el reflejado en toda la Figura 5.9.

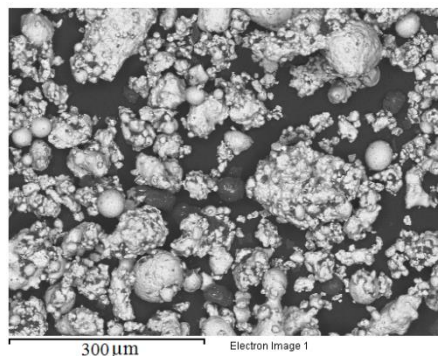


Figura.- 5.9. Imagen analizada. El espectro analizado abarca toda la imagen.

En color gris – blanco se muestra el elemento a cuantificar el cual se especifica en la parte inferior de cada una de las imágenes. Así, por ejemplo, tenemos que la primera imagen nos define la cantidad de Carbono que tenemos en superficie normal a la toma de la imagen. A tener en cuenta es que el polvo analizado está pegado en una base adhesiva para su mejor manipulación, y que ésta es polimérica, sea sé, base Carbono. Por lo que hay que discernir entre las partículas de estearato de zinc y la base adhesiva. La central derecha muestra donde tenemos Fósforo y la inferior izquierda donde domina el Hierro. Otros elementos como el Oxígeno, el Sodio o el Silicio también son analizados.

En la Figura 5.10 se observa claramente como el Hierro y el Carbono cubren la mayoría de la extensión. El Carbono que se observa en blanco parece ser únicamente el de la resina de estearato de zinc,



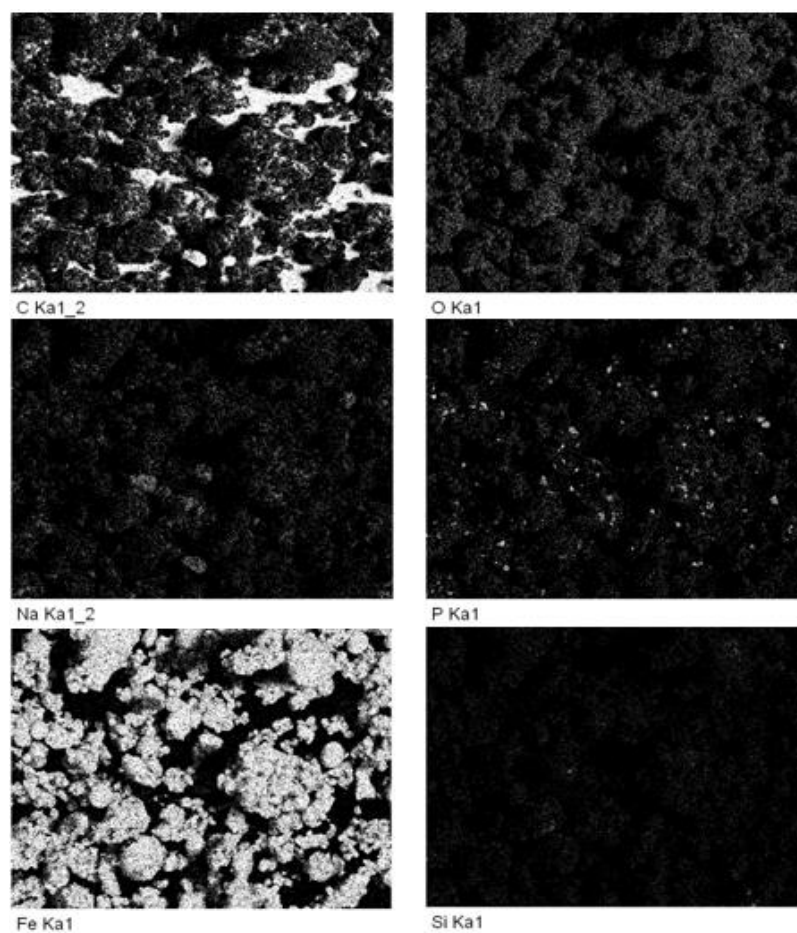


Figura.- 5.10. “Mapping” de los elementos encontrados en la Figura 5.9. En orden: Carbono, Oxígeno, Sodio, Fósforo, Hierro (predominante) y Silicio.



5.3 Identificación de los mecanismos de desgaste en noyos una vez fuera de servicio.

La Figura 5.11 resume las herramientas analizadas y su identificación, el material y número de piezas finales después de su retirada de producción, así como los principales motivos de ésta. Se han analizado un total de 5 noyos diferentes que han realizado entre 20.000 y 60.000 piezas, aproximadamente. En dos de los casos los noyos se retiraron de producción por presentar fractura de los pines y el resto por presentar desgaste excesivo, también a nivel de pines.

Herramienta ID	Material	Núm. Piezas	Fin de producción por
Noyo 0	ASP2012 (60-62HRC)	-	Fractura de pines
Noyo 1	ASP2012 (60-62HRC)	21500	Desgaste
Noyo 2	ASP2012 (60-62HRC)	43000	Desgaste
Noyo 3	ASP2012 (60-62HRC)	45000	Desgaste
Noyo 4	ASP2012 (60-62HRC)	60000	Desgaste + Fractura de pin derecho

Figura.- 5.11. Noyos analizados después de su vida en servicio.

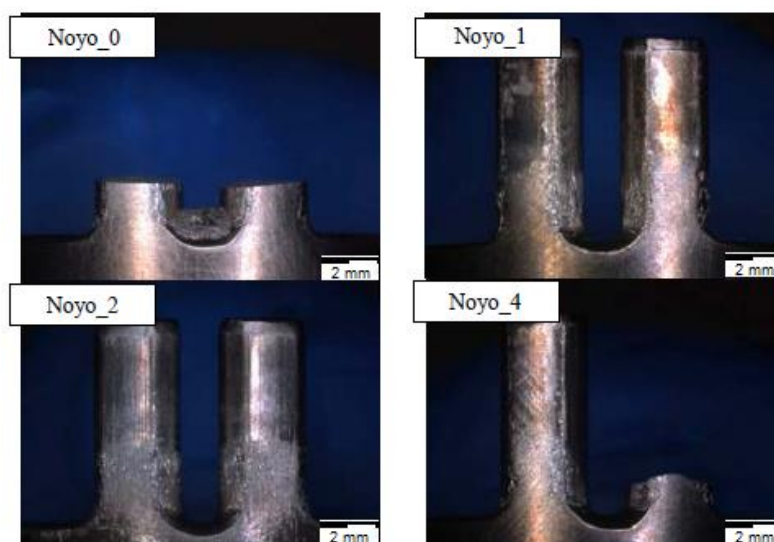


Figura.- 5.12. Estado de los noyos después de la retirada de la producción.

A continuación se definen los mecanismos de fallo observados en cada caso.



- **Noyo0:**

Entre los pines de esta herramienta se observa una elevada cantidad de material adherido (Figura 5.13 a)). Este material adherido corresponde al polvo empleado para la compactación de la pieza. La elevada adhesión de material provoca un aumento de la presión en esta zona de la herramienta que puede llegar a causar la rotura de los pines. En el lateral de estos pines se observan grietas producidas por el elevado estado tensional en esta zona (Figura 5.13 b)). Además, también se observan cavidades (de unos 10 μm de diámetro, aproximadamente) producidas por una deformación plástica excesiva en la superficie de la herramienta (hundimiento del material), adhesión del polvo empleado para la compactación de la pieza, surcos de desgaste abrasivo en la dirección de deslizamiento del polvo y desprendimiento de carburos (los carburos aparecen de color gris claro en la Figura 5.13b), y en gris más oscuro se observan cavidades del mismo tamaño una vez se han desprendido estos carburos).

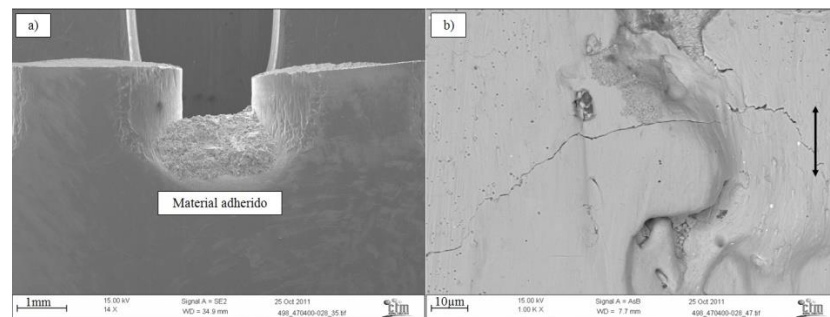


Figura.- 5.13. Imágenes SEM del Noyo0: a) La zona de los pines (14x) y b) zona lateral de uno de los pines (1000x). La flecha indica la dirección del deslizamiento. μ

- **Noyo 1:**

Se retira de producción por desgaste excesivo después de 21500 piezas fabricadas. En la zona más dañada, parte inferior de los pines, se observan también grietas, cavidades, desgaste adhesivo y abrasivo (Figura 5.14 a)). La parte superior de los pines no presenta desgaste, esta parte prácticamente no entra en contacto con el polvo y queda fuera del contacto con la pieza durante la compactación. Esta superficie ofrece características similares a la superficie inicial de preparación del noyo. Se pueden observar restos del mecanizado por electroerosión y del mecanizado mecánico (surcos perpendiculares a la dirección de deslizamiento), ver Figura 5.14 b).



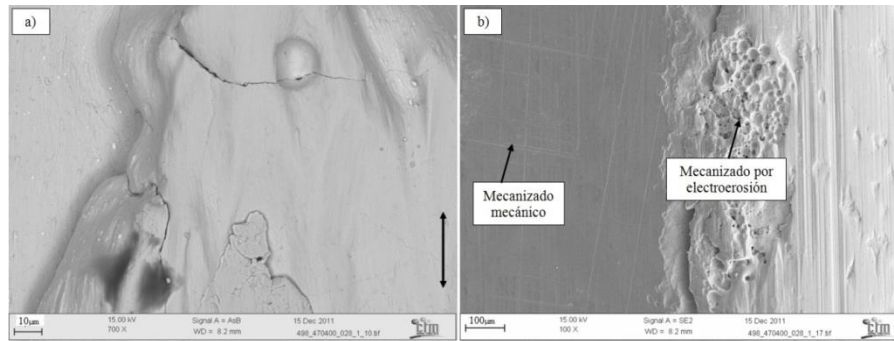


Figura.- 5.14. Imágenes SEM del Noyo1: a) zona inferior del lateral de un pin y (700x) b) zona superior del lateral de un pin (100x). La flecha indica dirección de deslizamiento.

• Noyos 2 y 3:

La retirada de producción de estos 2 noyos se produce por desgaste excesivo, después de 43000 y 45000 piezas, respectivamente. Al observar imágenes obtenidas en la superficie lateral de la zona inferior de los pines se detecta, principalmente, desgaste abrasivo a dos niveles (Figura 5.15):

- ✓ Surcos de desgaste abrasivo de 10-20 μm de ancho: posiblemente generados por la acción abrasiva del polvo empleado en la compactación. Dicho polvo contiene partículas de fosforo del tamaño de estos surcos.
- ✓ Surcos de desgaste abrasivo de 1-2 μm de ancho: generados por el desprendimiento de carburos del mismo tamaño, que una vez se desprenden de la matriz del acero ASP2012 contribuyen al desgaste abrasivo de la superficie de la herramienta.

Estos surcos se observan, en ambos casos, en la dirección de deslizamiento del noyo. También se observan cavidades producidas por una deformación excesiva de la superficie. Estas cavidades presentan geometrías semiesféricas y en forma de V invertida, geometría que se observa cuando hay una elevada interacción entre los materiales que están en contacto (posible adhesión) y elevada fricción con inicio de gripado.

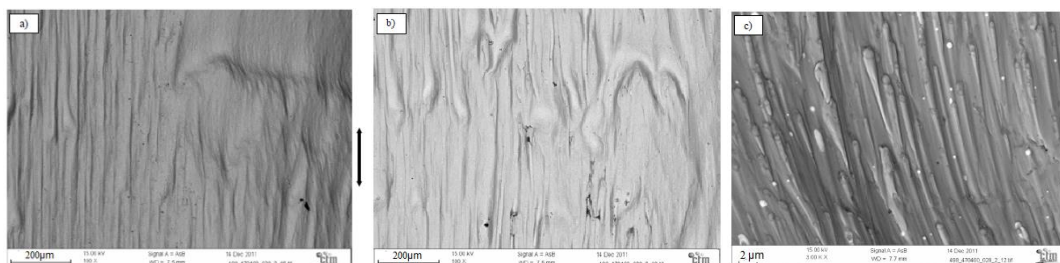


Figura.- 5.15. Imágenes SEM de los Noyos 2 y 3, de la parte inferior de los pines. a) y b) Muestran surcos de 10 a 20 μm de ancho y cavidades (100X); c) carburos y surcos (1 – 2 μm de ancho) (3000x) .



- **Noyo 4:**

En este caso la retirada del noyo se efectuó por rotura de uno de los pines después de 60000 piezas (como se puede observar en la Figura 5.16 a)), aunque cabe destacar que la superficie de las zonas más dañadas se pulió en algún momento durante la producción con el objetivo de eliminar los surcos de mayor tamaño producidos por desgaste (ver Figura 5.16 b)).

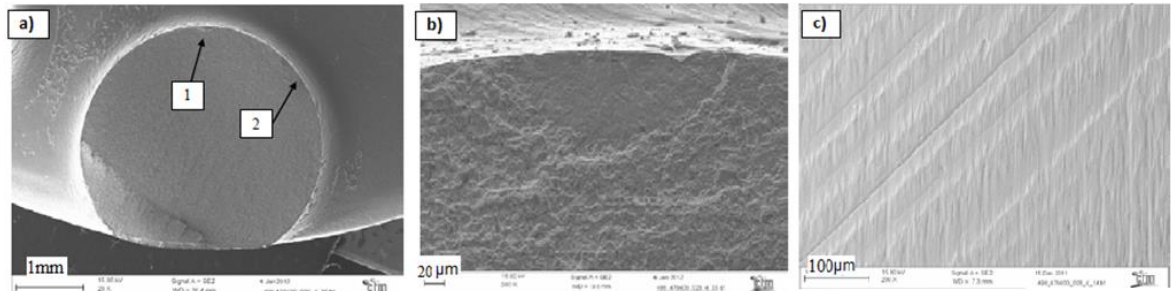


Figura.- 5.16. Imágenes SEM del Noyo4. a) Superficie de fractura del pin derecho (halos identificados como 1 y 2) (20x), b) Detalle del halo (500x) y c) zona inferior del pin izquierdo (200x).

En la Figura 5.16 a) se observan dos inicios de grietas en forma de halo. Esto permite pensar que la rotura fue inducida por fatiga, observando un inicio de grieta, una propagación y una rotura dúctil.

A modo de resumen, los principales mecanismos de fallo observados en los noyos analizados después de su vida en servicio son:

- ✓ Desgaste abrasivo y deformación en la superficie inferior de los pines (zona en contacto directo con el polvo durante la compactación).

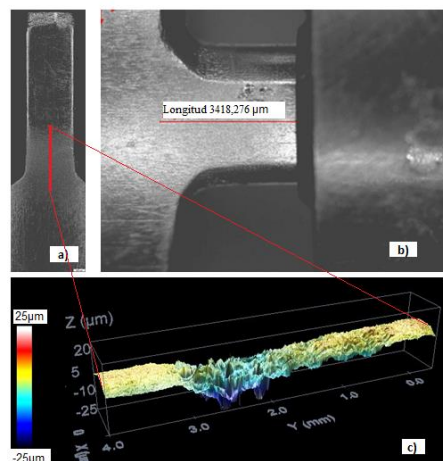


Figura.- 5.17. a) y b) Imagen tomada mediante lupa. En a) se observa la superficie desgastada, en contacto con el polvo en el momento de compactación y en b) su dimensión. c) Es una reproducción de 4 mm de longitud, tomada mediante la técnica de microscopía óptica confocal y tratada con el software SensoScan de la superficie desgastada.



- ✓ En menor medida también se ha identificado adhesión de polvo, desgaste adhesivo, y finalmente, en algunos casos, los noyos se han retirado de producción por fractura de los pines.

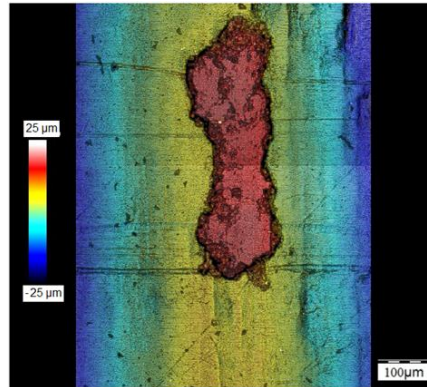


Figura.- 5.18. Imagen obtenida por microscopía óptica confocal de polvo adherido en superficie de herramienta (200x).

5.4 Identificación de los mecanismos de desgaste en punzones una vez fuera de servicio.

La identificación se ha llevado a cabo en los punzones a los cuales se les ha realizado el seguimiento a lo largo de su vida en servicio más un tercero del cual no se sabe el número de ciclos sufridos.

Todos los punzones analizados han sido provistos del recubrimiento Balinit Futura pero sus condiciones diversas durante su vida en servicio han hecho que sean diferentes los motivos de su retirada. El estudio se ha basado en el Punzón 2 del cual se tenía más información y su retirada fue la común en los punzones: desgaste a un elevado número de ciclos. En la siguiente tabla se resumen las características de los 3 punzones.

Herramienta ID	Material	Núm. Piezas	Fin de producción por
Punzón 0	ASP2012 + BALINIT FUTURA	?	Fractura
Punzón 1	ASP2012 + BALINIT FUTURA	15000	Mala instalación
Punzón 2	ASP2012 + BALINIT FUTURA	54400	Desgaste

Figura.- 5.19. Punzones analizados después de su vida en servicio.



A continuación se muestra una imagen del Punzón 2 después de 54400 piezas. La imagen muestra varios de los defectos hallados en el punzón, entre los que destacan las grietas producidas en la parte “inferior” de las “ventanas” en forma de arco y su desgaste en la zona superior, el desgaste en la zona perimetral de los orificios y el material adherido en las paredes interiores de éstos.

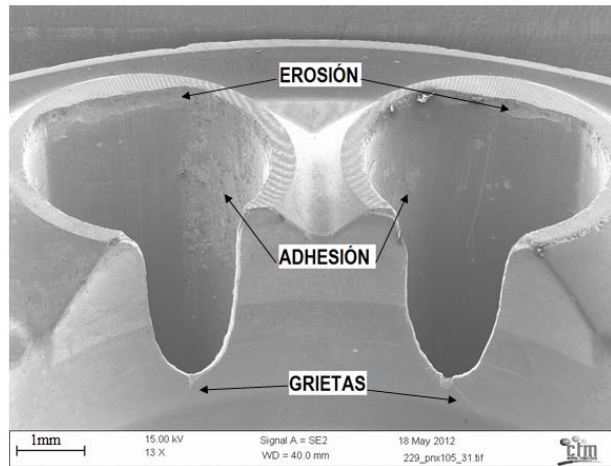


Figura.- 5.20. Detalle de la zona más crítica del punzón. Imagen tomada mediante SEM a 13x.

Tanto las grietas como la apertura superior de las “ventanas” son cotas críticas. Se han tomado imágenes a más aumentos los cuales nos han revelado la morfología de estas grietas. Tal y como se observa en la Figura 5.21, en la entallas el recubrimiento salta y en la zona de más entalla de la “ventana” se genera una grieta la cual se presenta tanto en la ventana derecha como la izquierda (Figura 5.21 a)).

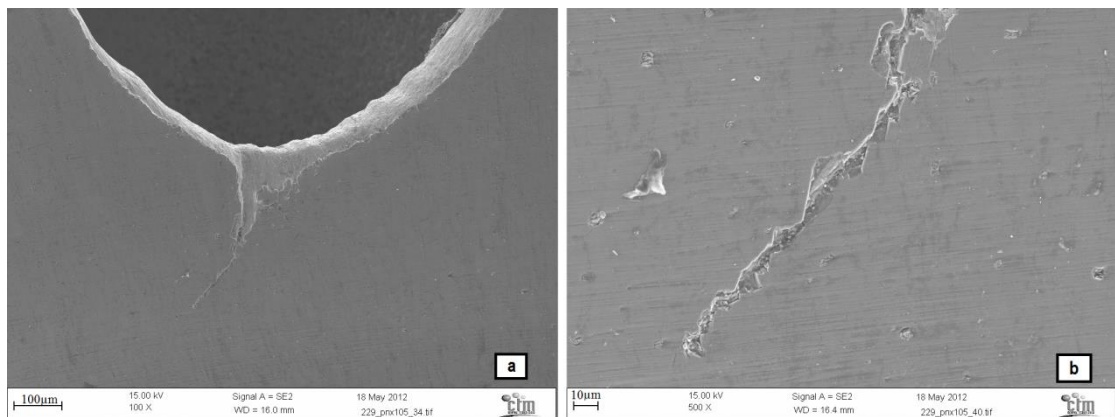


Figura.- 5.21. Imágenes tomadas mediante SEM de las grietas generadas en la base de las aperturas del punzón:
a) 100x y b) 500x.



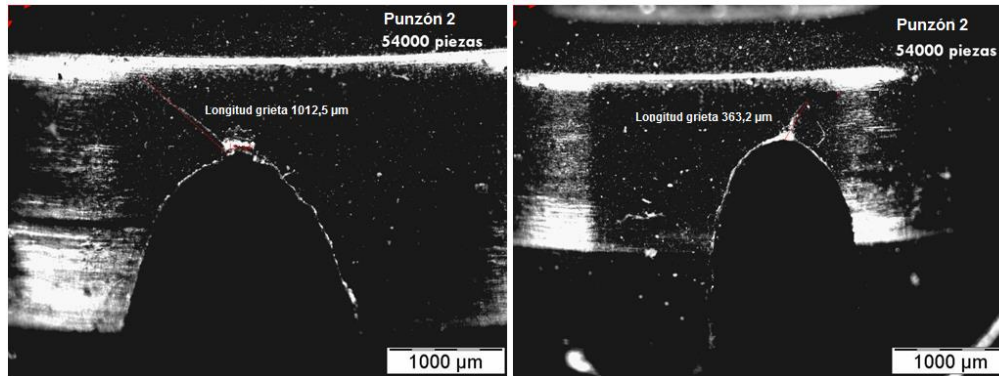


Figura.- 5.22. Imagen tomada mediante lupa. En ella se observan las grietas generadas en el punzón.

La generación de las grietas observables en la Figura 5.22 acaba produciendo roturas como las que se muestran en la siguiente imagen las cuales alteran las tolerancias de la pieza final.

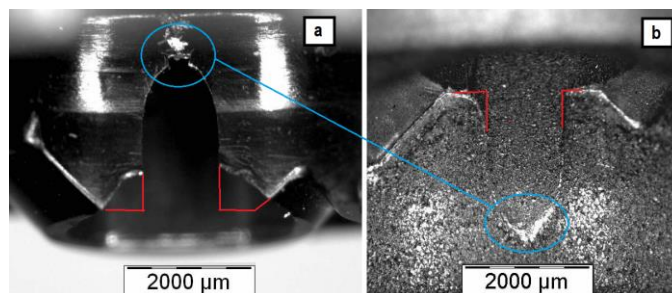


Figura.- 5.23. Imágenes tomadas mediante lupa de: a) Punzón 0; b) Pieza producida por el Punzón 0.

En la figura anterior se observan dos zonas deterioradas, en la parte inferior, y en rojo, se ve como se ha fracturado la herramienta menguando así la altura del arco y generando una apertura en la zona inferior por donde se puede introducir parte del polvo. En azul y en la parte superior del arco, se puede observar como la zona del punto de inflexión del arco ha sido fracturada y como esa muesca o rotura deja una muesca de gran semejanza en la pieza. Este fenómeno también es observable en la parte del noyo que está en contacto con dicha parte del punzón. El hecho que el punzón se vaya deteriorando y se abran sus orificios genera que la interficie “orificios punzón - zona posterior pines noyo” también evolucione tal como se muestra en la siguiente imagen.

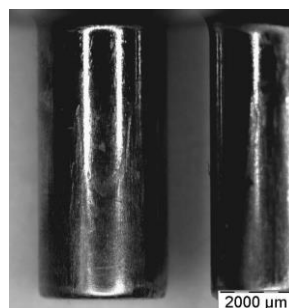


Figura.- 5.24. Imagen tomada mediante lupa de la zona posterior de los pines del noyo.



En el centro del pin izquierdo, se observa una muesca en forma de U que en su parte inferior incrementa su espesor. La U superior sería la inicial y la inferior la que se generaría a base del desgaste del punzón.

Un detalle a mencionar es la simetría de este tipo de defecto. En los punzones analizados, las dos aperturas se encontraban en las mismas condiciones, o ambas tenían grietas o ambas se encontraban ya fracturadas. Y también se aprecia que la disposición de las grietas es de 45° con la horizontal y simétricas, la de la izquierda para la izquierda y la de la apertura derecha para la derecha. Estos hechos dan a suponer que se puede estar delante de un fenómeno de fatiga mecánica, si bien también pueden coexistir otros fenómenos.

Otro defecto muy significativo es la adhesión de material en la parte interior de los orificios del punzón. El incremento de las tolerancias entre punzón y noyo por desgaste permite que el polvo metálico se introduzca con mayor facilidad entre la interficie de ambas herramientas. Al percibir grandes tensiones de compactación transformadas en parte, en tensiones cortantes, el polvo se deforma y se adhiere a la superficie del punzón reduciendo así las tolerancias de entrada y generando tensiones mayores en los pines por deflexiones e incluso puede llegar al gripaje del conjunto.

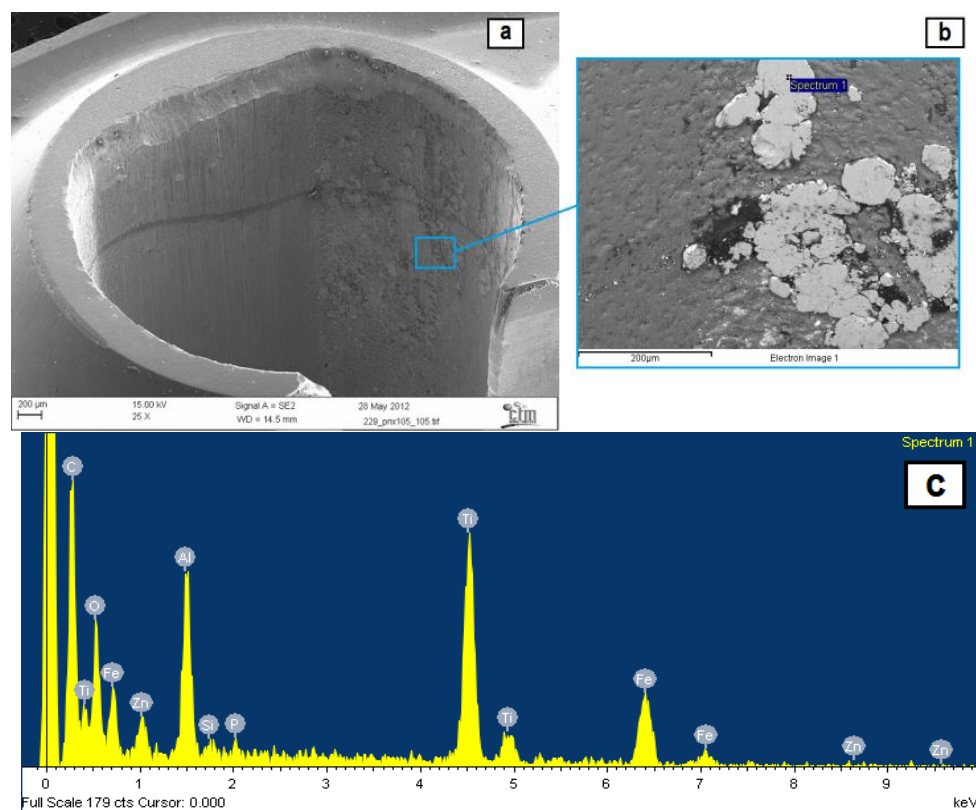


Figura.- 5.25. Material adherido en la parte interior de los orificios del punzón: a) Imagen tomada mediante SEM a 25x; b) Imagen tomada para el análisis mediante EDX del material adherido; c) El espectro obtenido del punto definido en b) como Spectrum 1.



Como se observa en la Figura 5.25. El material adherido es una mezcla del polvo metálico utilizado en el proceso de sinterizado (C, Fe y Zn,) con el material del recubrimiento (Al, Ti).

Los defectos en la zona lateral son los mismos que en la zona superior. Se observa como en las entallas (zonas anguladas) se produce el desconche del recubrimiento, facilitándose así la introducción del polvo de sinterizado en la zona lateral. En ésta se pueden hallar defectos de adhesión del polvo del orden de milímetros. También se observan mecanismos de rayado.

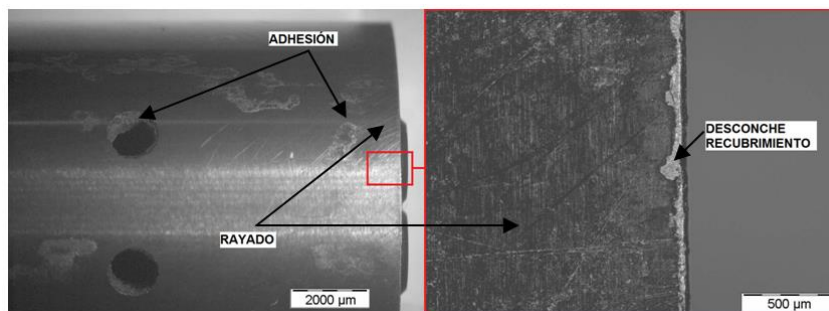


Figura.- 5.26. Imágenes tomadas mediante lupa de defectos hallados en la superficie lateral del Punzón 2.



5.5 Evolución de los mecanismos de desgaste con el número de ciclos

La sistemática para el análisis de la evolución de los mecanismos de desgaste ha consistido en tomar réplicas de las superficies de las herramientas en su estado inicial y a lo largo de su vida en servicio (parando la prensa) hasta su retirada de la producción por el motivo que fuere. A su vez, se han analizado también piezas sinterizadas obtenidas a distinto número de ciclos. A continuación se muestra una tabla con todas las herramientas analizadas. En ella se muestra su identificación, el número de piezas en los que se obtuvo réplicas, el motivo de la retirada de la producción y el número de piezas sinterizadas en relación a la obtención de las réplicas.

Fecha	Punzón 1	Punzón 2	Noyo 5	Noyo 6	Piezas Sinterizadas Obtenidas
16/02/2012	0 (inicio)		0 (inicio)		Nº de piezas en relación al noyo, entre paréntesis la cantidad de piezas obtenidas.
20/02/2012	10200	0	10200		
22/02/2012	15000 (fin)	(se monta) 9100	24100		(3) 0 (3) 10200
23/02/2012			37200 (fin)	0 (inicio)	(3) 24100
24/02/2012		28200		6000	(1) 37200
28/02/2012		54400 (fin)		32200	(2) 6000
29/02/2012				41300 (fin)	(2) 32200
15/06/2012					(2) 41300
Motivo retirada	Fractura pestaña	Desgaste	Desgaste	Desgaste	
Otros		Retocado zona orificios			
Recubrimiento	TiAlN	TiAlN	No	No	

Figura.- 5.27. Historial de las réplicas obtenidas de las herramientas analizadas.

Como se puede observar en la Figura 5.27, el uso de la silicona para la reproducción de las superficies de herramientas ha sido extenso. De cada herramienta se han obtenido varias réplicas de la misma zona post lavado de la misma con alcohol y algodón. La calidad de las réplicas obtenidas es de gran importancia en el proceso de análisis pues puede inducir a defectos irreales modificando la superficie de la réplica.



5.5.1 Evolución de los mecanismos de desgaste observados en el noyo.

5.5.1.1 Evolución de los parámetros de rugosidad superficial bajo normativa ISO 25178.

Las Figuras 5.28 y 5.30 recogen los resultados de los parámetros de rugosidad 3D obtenidos en el Noyo 5 y en el Noyo 6, respectivamente. Los valores graficados son la media entre los resultados obtenidos en el pin izquierdo y el pin derecho para las zonas inferior (zona más dañada) y en la zona superior (menos dañada, no hay contacto con el polvo durante la compactación). En general se observa que los parámetros de rugosidad presentan valores más elevados en las zonas inferiores (color azul) que en las zonas superiores (rojo). Por el contrario, el comportamiento de los dos noys difiere. Esto puede ser debido a que al Noyo 5 se le cambia el punzón después de 15000 ciclos, aguantando éste hasta los 37200 ciclos. Una vez desechado, se instala el Noyo 6 el cual interactúa con un Punzón 2 el cual ya ha sufrido los suficientes ciclos como para estar algo deteriorado y permitir una mayor introducción de polvo entre los pares tribológicos.

Se han graficado varios parámetros de rugosidad de los cuales se ha hecho una selección por ser los más informativos. Para el análisis de resultados se han utilizado los valores obtenidos del Noyo 6 ya que representa que sus solicitaciones han sido más homogéneas por el hecho de no haber interactuado con una herramienta mal alineada (Punzón 1). La siguiente imagen corresponde a los valores del Noyo 5.

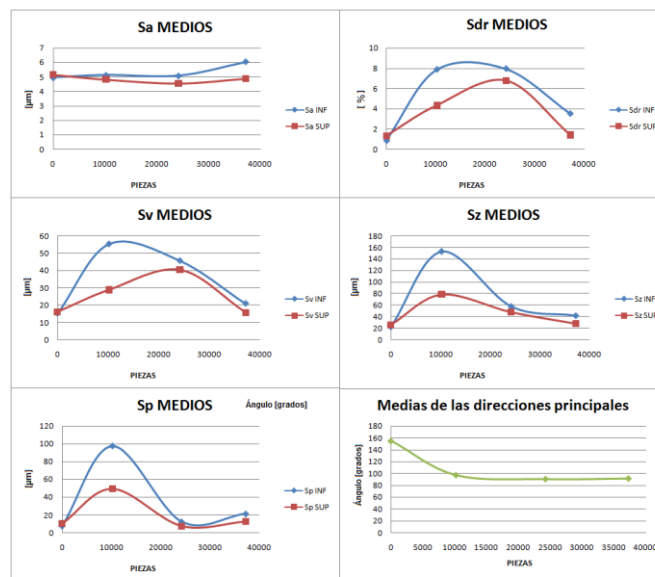


Figura.- 5.28. Gráficos obtenidos para el Noyo 5, de los parámetros superficiales: Sa, Sv, Sp, Sdr, Sz y media de las direcciones principales de la textura superficial.

En la Figura 5.29 se compara la superficie superior del Noyo 5 después de 24100 piezas con la del Noyo 1 después de 21500 piezas y se observa un aumento en la cantidad y profundidad de surcos paralelos a la dirección de deslizamiento debido a un mayor contacto con la pared del punzón. Sirviendo de comprobación para desestimar en un principio los valores de rugosidad del Noyo 5.



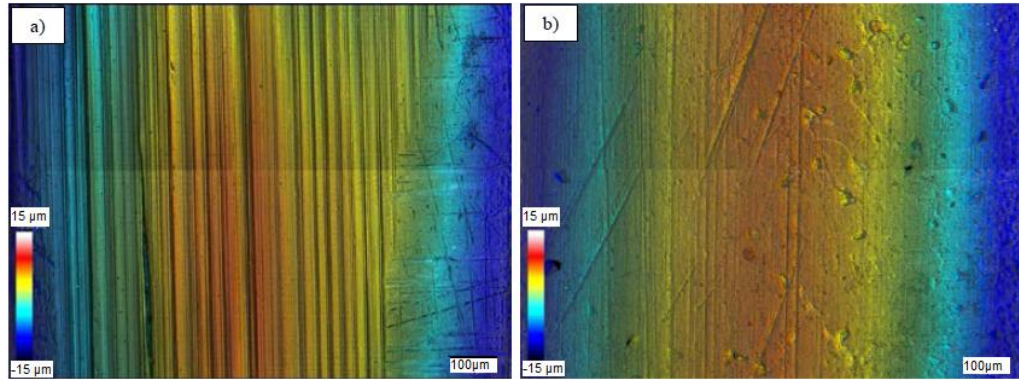


Figura.- 5.29. Imagen tomada mediante microscopía óptica confocal a 200x y tratada con el programa SensoScan de la superficie del Noyo 5 y Noyo 1 respectivamente.

Los valores del Noyo 6 se toman como óptimos y se muestran a continuación.

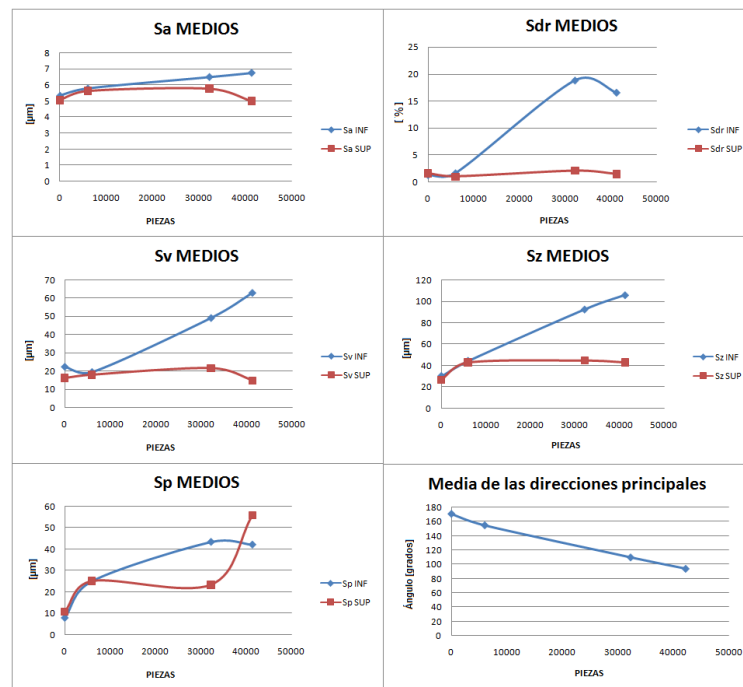


Figura.- 5.30. Gráficos obtenidos para el Noyo 6, de los parámetros superficiales: Sa, Sv, Sp, Sdr, Sz y media de las direcciones principales de la textura superficial.

El comportamiento de la textura superficial se intuye en las gráficas donde se analiza la evolución de la media de las direcciones principales. Para mejor comprensión .se puede observar la siguiente figura donde el programa SensoMap proporciona gráficos donde se muestran las direcciones principales de la textura superficial. Se puede observar la evolución desde la textura del mecanizado (0 piezas), hasta la textura generada por mecanismos de abrasión (32200 piezas).



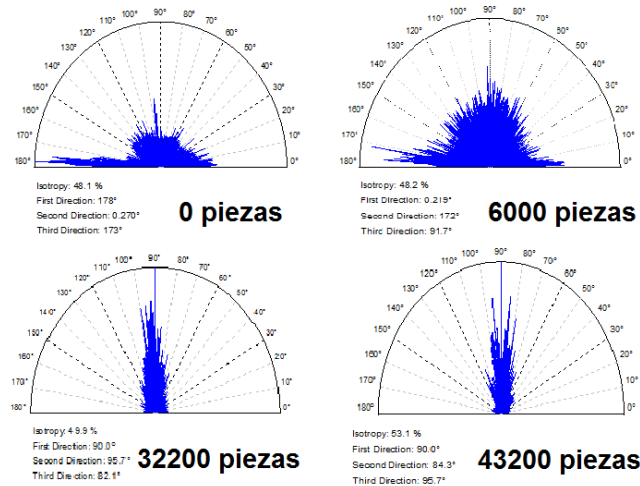


Figura.- 5.31. Evolución del gráfico generado por el programa SensoMap de las direcciones de la textura superficial para el Noyo6.

Si observamos la morfología superficial, comprobaremos que la superficie se va desgastando paulatinamente y que su morfología está condicionada por el movimiento relativo entre las herramientas (flecha negra en la Figura 5.32).

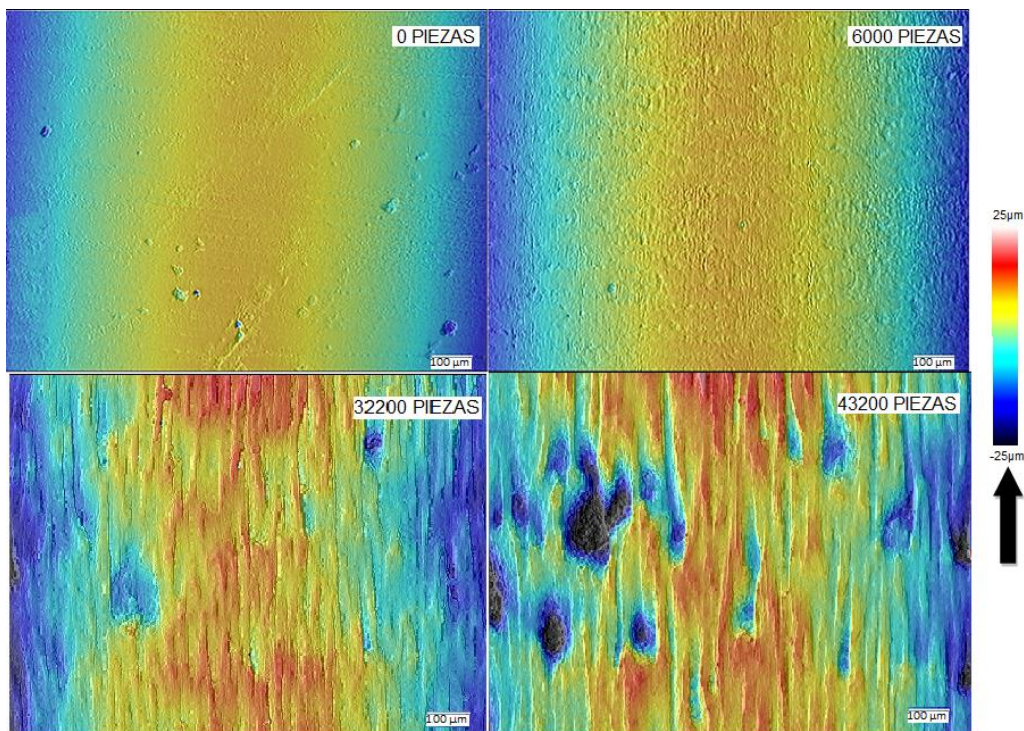


Figura.- 5.32. Evolución de la superficie Anterior Inferior Izquierda (AII) del Noyo6. Imágenes tomadas mediante microscopia confocal a 200xy tratadas con el programa SensoScan.



Volviendo a los gráficos de parámetros y más concretamente en los obtenidos para el Noyo 6 (Figura 5.30), se observa que el parámetro S_a prácticamente no varía con el número de ciclos, puesto que este parámetro de amplitud representa la altura promedio de la muestra y no distingue entre superficies con gran cantidad de defectos de tamaño pequeño, por ejemplo, y superficies con menor cantidad de defectos pero de mayor tamaño (aunque es uno de los parámetros, junto con S_q , más conocidos y empleados para representar la rugosidad de superficies).

Uno de los parámetros más representativos para el análisis superficial es el S_{dr} , puesto que ofrece información global del área superficial (incluyendo micro-rugosidad, rugosidad y ondulación) y es uno de los parámetros que se ha tomado para el estudio de la evolución. Para el Noyo 6 se ve un gran aumento para las 30.000 piezas indicando que la superficie presenta síntomas claros de desgaste. También observar que la zona superior e inferior empieza igual pero que a partir de cierto número de piezas se observa una gran diferencia entre ambas.

Los parámetros S_v , S_p y S_z muestran la evolución del mayor tamaño de valle, pico y altura total, respectivamente. Estos parámetros, si bien no son representativos de toda la superficie (solamente del defecto de mayor tamaño), pueden estar relacionados con el mecanismo de fallo o con algún otro defecto de la superficie analizada (debido a la adquisición de la imagen, ondulación de la muestra, etc.). Éstos se utilizan para determinar la profundidad máxima de los defectos y surcos.

Para el Noyo 6 se observa claramente como a partir de las 30.000 piezas la superficie se encuentra muy deteriorada y que el mecanismo principal es la abrasión por segundas y terceras partículas. A su vez, se observa que la parte inferior de los noyos es la que se desgasta más rápidamente. Sin embargo, la zona superior, después de un periodo de transición se muestra constante.

A modo de resumen, de las gráficas de parámetros de rugosidad superficial se obtienen las siguientes conclusiones:

- ✓ La rugosidad media inicial es de $5\text{ }\mu\text{m}$.
- ✓ Inicialmente, las superficies ya tienen defectos del orden de las 15 micras.
- ✓ Ambas zonas, superior e inferior, evolucionan de forma similar, la diferencia es que la zona inferior, en contacto con el polvo abrasivo, se desgasta más.
- ✓ La evolución de la superficie sigue el siguiente orden:
 - 1º) Inicialmente la superficie tiene la rugosidad generada por el proceso de mecanizado.
 - 2º) 0 - 10.000 piezas se liman las asperezas superficiales, reduciéndose el parámetro S_{dr} . Empiezan a observarse el deterioro superficial. Se pierde la textura del mecanizado. Esto ocurre en la zona superior e inferior.



3º) 10.000 - 25000 piezas se incrementan los mecanismos de desgaste y la textura empieza a ser paralela a la dirección del movimiento relativo entre las herramientas (contacto con el polvo, desgaste por tercer cuerpo). Sobre todo se acentúan en la zona inferior.

4º) 25.000 - 40.000 piezas, la superficie está muy desgastada. Su textura responde a mecanismos de abrasión generados por el polvo.

También se han determinado los parámetros Sa y Sdr de los nuyos después de su retirada de producción con la intención de verificar si se encontraban dentro de lo esperable. En la Figura 5.33 se muestra el conjunto de resultados obtenidos con todos los nuyos analizados. Los valores de Sa están comprendidos entre 4,5 y 7,5 μm , no se observa demasiada variación con el número de ciclos (para las zonas inferior y superior de los pines). El parámetro Sdr muestra mayor variación con el número de ciclos (se muestran sólo los valores de la parte inferior de los pines, que corresponden a las zonas con mayor daño). Los valores Sdr para el Noyo1 y Noyo4 son muy bajos. El Noyo4 se pulió o mecanizó en algún momento de la producción, disminuyendo el tamaño de defectos y surcos. En el Noyo1 no se observaron líneas de mecanizado, sin embargo los valores de rugosidad son bajos para los ciclos sufridos. Los Nuyos 2 y 3 presentan valores de Sdr intermedios entre los Nuyos 5 y 6 (con número de ciclos inferior).

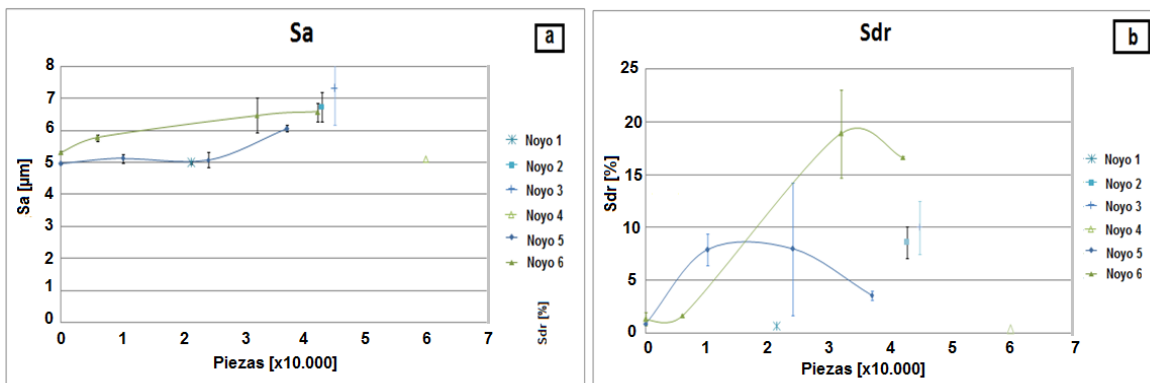


Figura.- 5.33. Evolución con el número de ciclos de los parámetros superficiales de rugosidad obtenidos de réplicas extraídas de los nuyos: a) Sa de las zonas inferior de los pines y b) Sdr de la zona inferior.

5.5.1.2 Evolución de los defectos puntuales.

La profundidad máxima de los defectos puntuales (cráteres, cavidades) y de los surcos (tanto del mecanizado inicial como los que se generan por desgaste abrasivo y son paralelos a la dirección de deslizamiento), se muestra en la Figura 5.34.



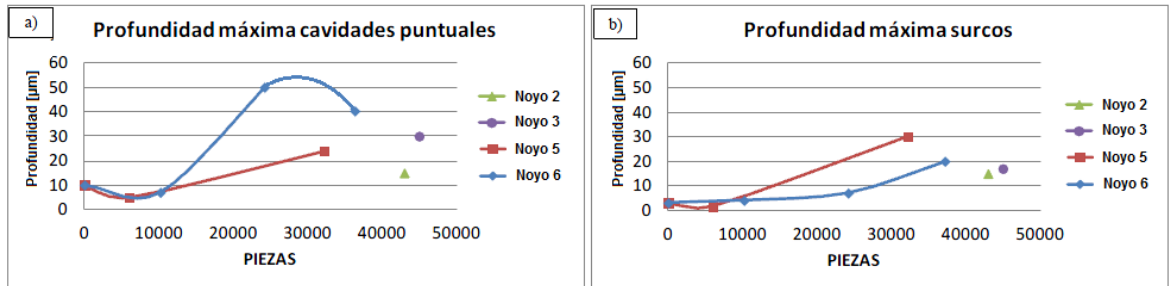


Figura.- 5.34. Evolución con el número de ciclos de a) la profundidad máxima de defectos puntuales y b) de surcos de mecanizado o desgaste abrasivo.

En el estado inicial, 0 ciclos, se observan los defectos asociados a la producción del noyo (cavidades generadas por electroerosión y rayado por mecanizado). A medida que aumenta el número de ciclos estas cavidades disminuyen su profundidad (se lijan las asperezas y defectos por desgaste abrasivo) hasta que se generan cavidades de mayor tamaño (por desgaste abrasivo y deformación, como se ha observado en las gráficas de parámetros superficiales). Para la profundidad máxima de surcos se observa la misma tendencia. Ver Figura 5.35.

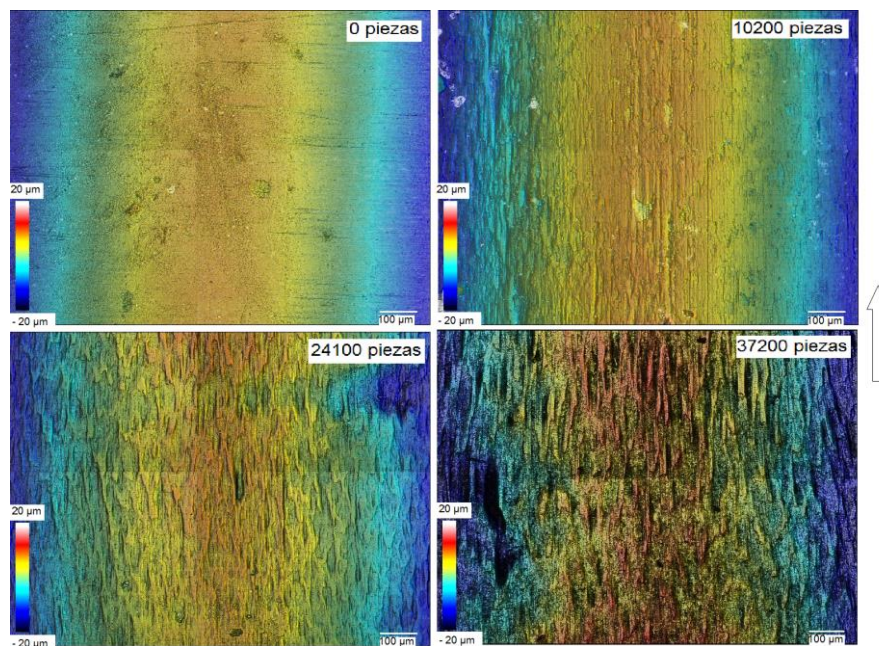


Figura 5.35. Evolución de la superficie del Noyo 6. Imágenes tomadas a 200x mediante microscopía óptica confocal y tratadas con el software SensoScan. La flecha indica la dirección del movimiento relativo entre herramientas.

5.5.1.3 Evolución del perfil de los pines.

Se analiza el perfil anterior de los noyo en busca de mecanismos de desgaste en la escala macro. La zona analizada está en contacto directo con el polvo de sinterizado en el momento de



compactación y por eso se espera tanto deformación plástica como mecanismos de desgaste abrasivos. Al llevar a cabo la evolución del perfil de la parte anterior de los pines del noyo se ha observado que se produce la modificación de su morfología en función del número de ciclos generándose un “valle” en la zona en contacto con el polvo. Este defecto influye en las tolerancias de los agujeros de la pieza final. Dicho fenómeno se observa claramente en la Figura 5.36 donde se muestran imágenes tomadas mediante microscopía óptica confocal del perfil anterior de los pines en función del número de ciclos realizado. Las imágenes son tanto del Noyo 5 como el 6. .

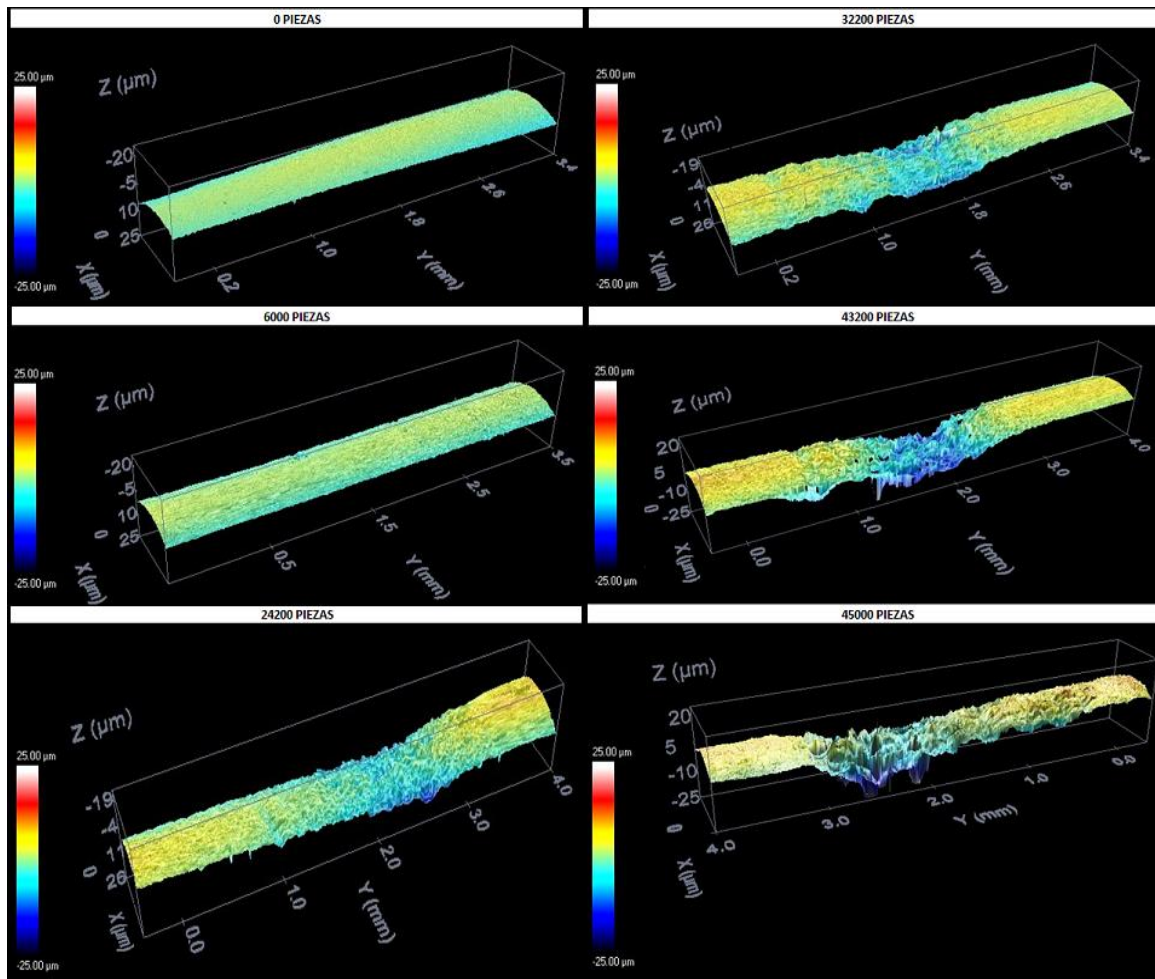


Figura.- 5.36. Evolución del perfil anterior del pin en función del número de piezas e independiente del noyo.

Imágenes tomadas mediante microscopía confocal a 200xy tratadas con el programa SensoScan.

En la figura siguiente se muestra la evolución del perfil del Noyo 5 en función del número de piezas. Esta figura permite ver claramente como se genera una deformación en forma de “valle”.



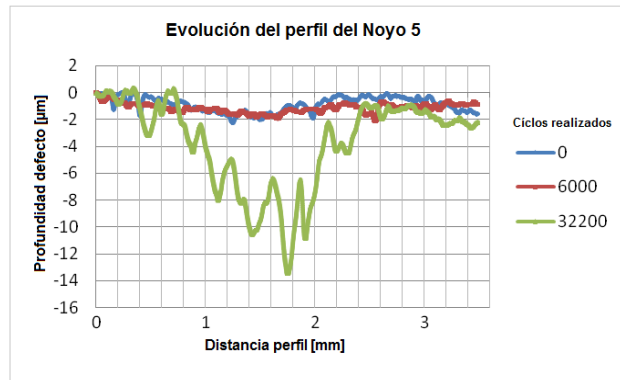


Figura.- 5.37. Evolución del perfil del Noyo 5.

Tanto la profundidad máxima como el área de desgaste obtenidas en todos los noyos analizados se grafican en la Figura 5.38. En general se observa un aumento del desgaste con el número de ciclos (con la excepción de 21500 y 60000 ciclos, que corresponden a los Noyos 1 y 4, respectivamente, y que han sufrido un pulido o mecanizado en algún momento durante la producción).

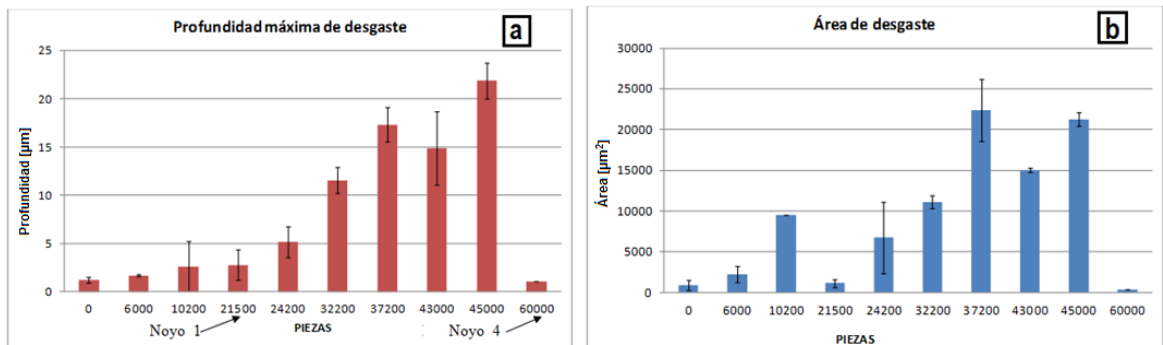


Figura.- 5.38. Profundidad máxima y área de desgaste versus número de ciclos en la zona inferior de los pines.

Un aspecto interesante es que tanto la profundidad del defecto como el área asociada al perfil medio extraído, siguen una tendencia ascendente durante todo el proceso y que dicha profundidad puede ser de gran importancia para determinar los ciclos de vida óptimos de las herramientas.



5.5.2 Evolución de los mecanismos de desgaste en el punzón.

Se ha llevado a cabo el análisis de la evolución de los mecanismos de desgaste en uno de los punzones, en concreto el Punzón 2 puesto que el Punzón 1 se retiró de la producción por rotura prematura debida a un mal alineamiento de la herramienta.

El análisis de los defectos se ha llevado a cabo mediante observaciones y mediciones puntuales en la zona lateral obteniendo la siguiente evolución:

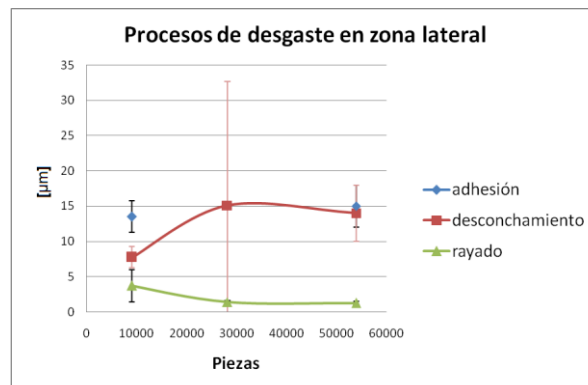


Figura.- 5.39. Evolución de los mecanismos de desgaste en la zona lateral del Punzón 2.

Se ha hallado que los mecanismos de adhesión son dinámicos. El polvo de sinterizado se adhiere a la superficie en forma de placas pero su adhesión no está relacionada con el número de piezas producidas. El material se adhiere donde la superficie tiene alguna imperfección que le pueda servir de elemento nucleante como pueden ser las microgotas generadas por el proceso del recubrimiento o el rayado de la superficie durante el mecanizado. La imagen que se muestra a continuación esta obtenida sobre la superficie lateral del Punzón 2 antes de su entrada en servicio. Se pueden observar los dos defectos antes mencionados, claramente se observan mecanismos de rayado transversal pero si uno se fija, observa que hay pequeños defectos circulares. Dichos defectos son las microgotas que se producen durante el proceso de recubrimiento y que por los motivos que sean han saltado dejando en vez de una protuberancia, un pequeño desconche del recubrimiento.

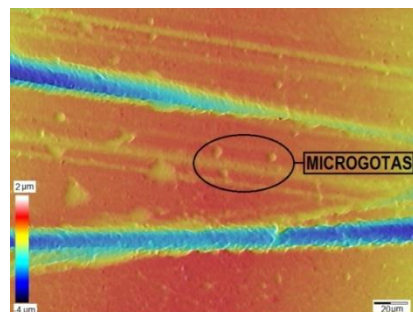


Figura.- 5.40. Detalle de los defectos superficiales iniciales en la zona lateral del punzón.



Pero como se ha mencionado, el mecanismo de adhesión se presenta dinámico. Se inicia en cualquier lugar aleatoriamente y la placa de material adherido se disgrega en varias placas más pequeñas, luego crece, desaparece, y así sucesivamente, así que tenemos que su evolución es aleatoria y que su generación parece depender más del acabado superficial que de los mecanismos de desgaste puesto que, con el recubrimiento que se le ha producido, la superficie se presenta casi inalterable en todo el proceso. A continuación se muestra la morfología de unas de las placas de material adherido. Su ubicación en la herramienta no era exactamente la misma pero sí que estaba muy cerca por lo que se supone que es la misma placa que ha evolucionado en varias partes y se ha movido de posición.

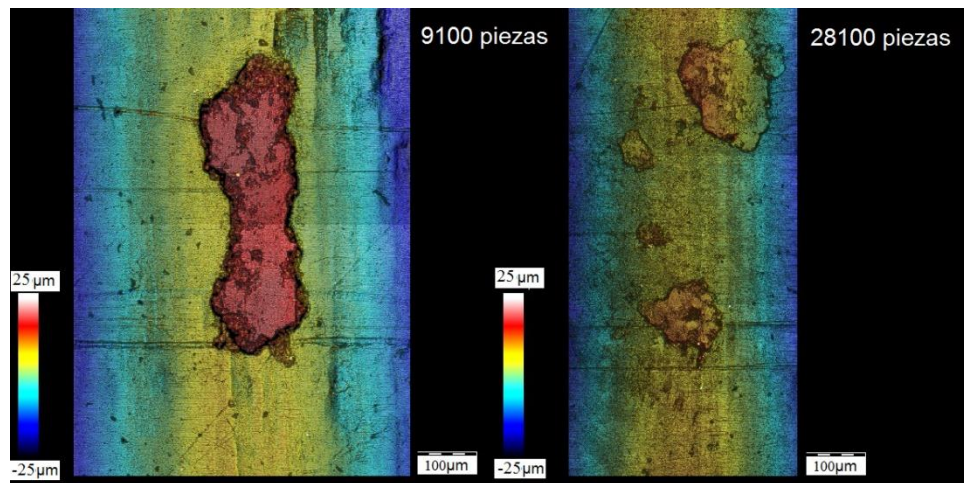


Figura.- 5.41. Imágenes producidas a 200x mediante microscopía óptica confocal de diferentes ejemplos de adhesión hallados en el Punzón 2.

También se halla desconchamiento del recubrimiento en forma de cráter, de profundidad variable, muchas veces mayor a la del recubrimiento (del orden de los 3 micrómetros), induce a pensar que pueden ser debidos a desgaste por impacto, por fatiga o por abrasión de terceras partículas. El resultado se muestra en la siguiente imagen:

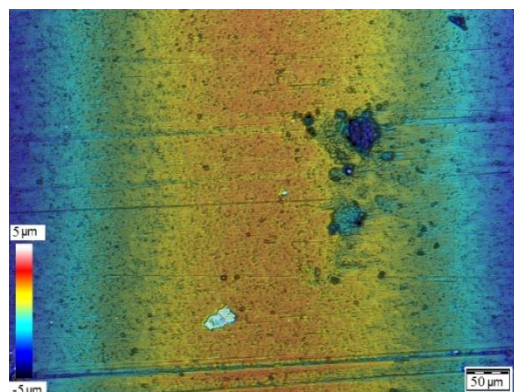


Figura.- 5.42. Imagen tomada mediante microscopía confocal a 200x y reproducida por el programa SensoScan de un proceso de desconche.



Los mecanismos de rayado se muestran como poco trascendentales a lo largo de la vida en servicio del punzón. Su magnitud es del mismo orden e incluso inferior que el rayado producido en el mecanizado.

5.6 Diseño de ensayos tribológicos para reproducir los mecanismos de desgaste observados en las herramientas

Se ha llevado a cabo la puesta a punto de ensayos tribológicos con la intención de fijar los parámetros que luego servirán para la futura comparación de materiales. El objetivo principal de estos ensayos es reproducir los mecanismos de desgaste identificados en las herramientas industriales. Si bien se han conseguido ver suficientes diferencias en función de las condiciones de los ensayos y los materiales ensayados, no se ha podido recrear exactamente las condiciones sufridas por las herramientas en servicio puesto que estas dependen de muchos factores, entre ellos, el factor humano, el cual puede, por ejemplo, propiciar al mal alineamiento de la herramientas generando la rotura prematura de la herramientas. También se debe tener en cuenta que las solicitaciones reales en servicio son dinámicas y la mayoría de veces son más elevadas que las que se pueden generar en las máquinas de ensayos disponibles. Las tensiones generadas en cada ciclo varían a lo largo de éste y los pares tribológicos no son exactamente iguales, además de esto, en el caso de los ensayos de abrasión RWAT, está comprobado que también influyen las propiedades del material de la rueda, al utilizar una rueda de goma más blanda, la velocidad de desgaste del acero para herramientas disminuye con un aumento en la carga y se atribuyó a un aumento del área de contacto entre la rueda y la muestra [12].

Delante de la imposibilidad de la recreación exacta de las condiciones en servicio y sabiendo de la limitación existente en las máquinas de ensayo para aplicar según que fuerzas o velocidades, se opta por modificar en mayor o menor medida los ensayos definidos bajo las normativas ASTM dentro de las posibilidades de las máquinas siempre a favor de una mejor comprensión de los mecanismos de desgaste generados.

Se han llevado a cabo la puesta a punto de dos tipos de ensayo, en el ensayo de RWAT se pretenden analizar los fenómenos de desgaste relacionados con la abrasión. Para ello se han modificado los parámetros de carga aplicada, cantidad de polvo por ensayo, velocidad angular de la rueda y el material de ésta, hasta que se han hallado las condiciones óptimas de ensayo para los materiales analizados. En los ensayos de “Pin on disk”, los parámetros evaluados han sido la carga aplicada, la densidad de las muestras, el radio de giro del pin en relación al disco, la velocidad angular del disco y el tiempo de ensayo.

En ambos ensayos, el procedimiento seguido ha sido iniciar con la puesta a punto, la cual embarcaba todas las modificaciones de parámetros hasta que se decide, en función de los resultados y de los medios, los parámetros definitivos. Una vez escogidos, se llevan a cabo una serie de ensayos en dichas condiciones sobre los materiales actuales y alternativos para obtener una clasificación en



función de su resistencia al desgaste. La evaluación de materiales alternativos queda fuera del alcance del presente proyecto.

5.6.1 Ensayos de abrasión (Rubber Wheel Abrasión Test).

5.6.1.1 Puesta a punto.

Para la puesta a punto del ensayo RWAT se realizaron diferentes ensayos sobre ambos lados de una de las probetas de ASP2012. En la Figura 5.43 se resumen las diferentes condiciones aplicadas hasta llegar a las condiciones óptimas de ensayo.

Condición	1	2	3	4	5	6	7
Carga [N]	144	239,8	348,6	347	349	347	349,3
Velocidad de giro [rpm]	30	30	30	60	100	150	150
Cantidad de polvo por pasada [kg]	5	5	5	5	10	10	10
Número de pasadas	2	2	2	2	1	1	1
Distancia recorrida por la rueda [m]	271	270,6	261	537	900,4	1306	1304,7
Distancia recorrida por el polvo [m]	271	541,6	261	978	900,4	2206,4	3511,1

Figura.- 5.43. Tabla resumen de las diferentes condiciones de ensayo RWAT durante la puesta a punto.

Durante la puesta a punto se observa que a mayor es la velocidad de giro de la rueda, mayor es la proporción de polvo que se introduce en la interfase rueda - probeta. Para una velocidad angular de 30 rpm la cantidad de polvo que se introduce entre la probeta y la rueda se estima (visualmente) en un tercio, sin embargo, para 150 rpm, se estima en dos tercios. A su vez, durante la puesta a punto, se toman muestras del polvo el cual no se cambia en las condiciones 1 y 2, 3 y 4 y 5, 6 y 7.

La transferencia de masa generada por el ensayo en la probeta es del orden de los miligramos y la superficie desgastada se presenta de la siguiente manera.



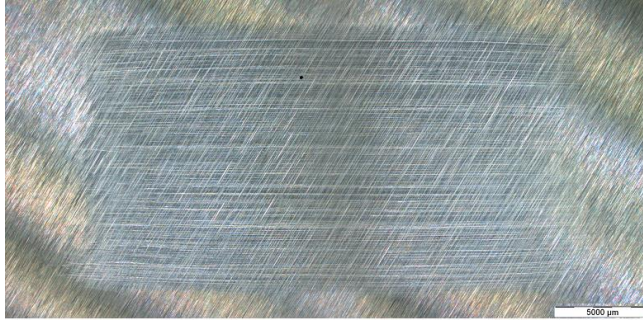


Figura.- 5.44. Imagen tomada con lupa de la huella obtenida con la carga 150 N.

Igual que en el caso real, la evolución de la superficie pasa de un estado donde predomina el acabado del mecanizado a un estado donde se observan, claramente, procesos de desgaste en la dirección del movimiento relativo de las partículas de polvo y la superficie de la probeta.

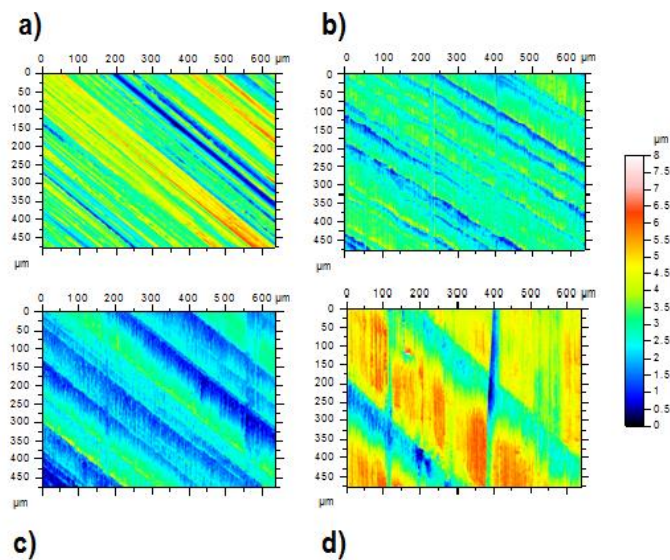


Figura.- 5.45. Imágenes obtenidas por microscopía óptica confocal y tratadas mediante el programa SensoMap de análisis de imagen: a) Estado inicial; b) 350N, primera pasada del polvo (10kg), 100rpm, 900 metros; c) 350N, segunda pasada del polvo (10+10 = 20kg), 150 rpm, 2200 metros y d) 350N, tercera pasada (30kg), 3500 metros.



5.6.1.2 Resultados de los ensayos RWAT.

Se llevaron a cabo dos ensayos RWAT por cada tipo de probeta. Las condiciones de los ensayos se muestran en la siguiente tabla:

Carga Nominal (N)	350
Velocidad de giro (rpm)	150
Cantidad de polvo por pasada (kg)	10
Número de pasadas (sin cambiar el polvo)	3
Distancia recorrida por la rueda (m)	3500

Figura.- 5.46. Tabla con las condiciones de ensayos seleccionadas mediante la puesta a punto.

Se ha observado que en la primera pasada de 10 kg de polvo, la masa de la probeta se reduce para luego incrementarse en las pasadas posteriores. Este fenómeno sucede tanto en las probetas recubiertas como en las sin recubrir. Este comportamiento responde a que inicialmente se genera una remoción de las asperezas superficiales para luego pasar a fenómenos de adhesión de material tal y como se muestra en los siguientes gráficos.

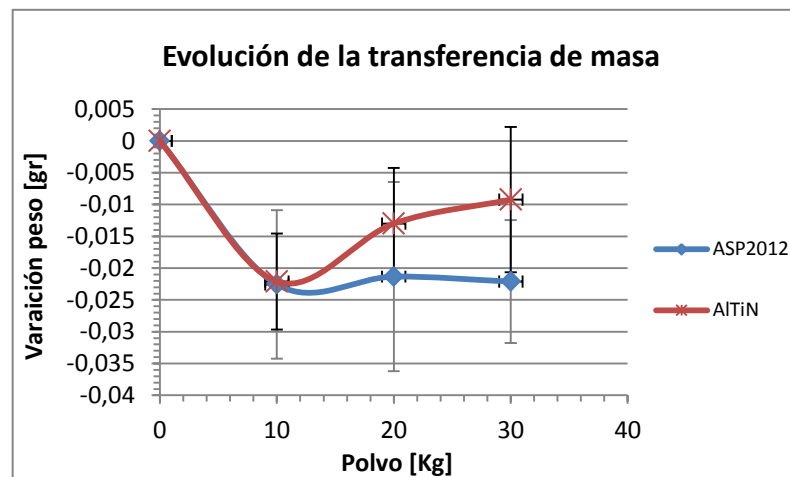


Figura.- 5.47. Evolución de la transferencia de masa en probetas con y sin recubrimiento.

Mediante microscopía óptica confocal y el programa SensoMap se analizan los parámetros de rugosidad superficial S_a y S_{dr} evidenciando que los valores iniciales difieren de los estimados en las herramientas. En el siguiente gráfico se muestra su evolución para la carga de 350N en el estado inicial, 20 y 30 kg para una probeta de material ASP2012 sin recubrir. Este hecho hace que no se puedan comparar con los valores obtenidos en las herramientas pero por lo menos permiten observar un comportamiento acorde al descrito por la evolución de la transferencia de masa.



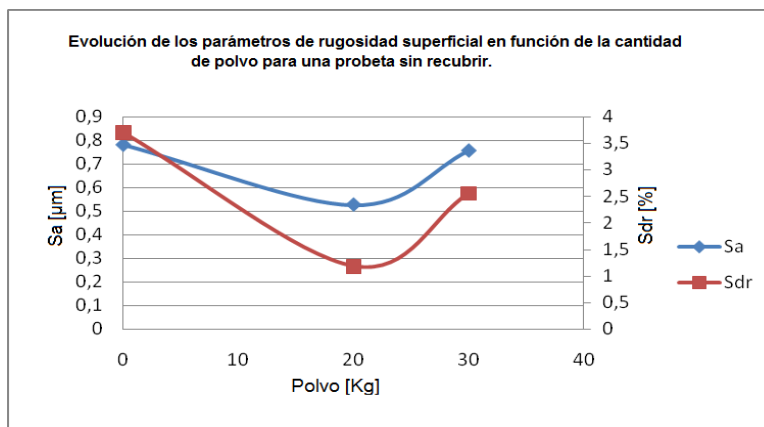


Figura.- 5.48. Evolución de los parámetros de rugosidad superficial en función de la cantidad de polvo para una probeta sin recubrir.

Del gráfico se extrae que la superficie pasa de un estado inicial (coherente con el mecanizado), a un estado donde las asperezas van siendo pulidas para dar paso a partir de la segunda pasada (20 kg de polvo), a una superficie más deteriorada donde existen mecanismos de abrasión y adhesión.

Este comportamiento también se observa cuando analizamos la evolución de las direcciones principales de la textura superficial. Este parámetro es el que permite evidenciar mejor la diferencia de comportamiento entre la superficie recubierta y la no recubierta. Así, para las probetas no recubiertas, la superficie evoluciona de tal manera que la dirección principal de la textura es la del mecanizado pero después de la tercera pasada, la dirección principal es la generada por los mecanismos de abrasión y es paralela al movimiento relativo del polvo con la probeta. A continuación se muestra gráficamente (Figura 5.49) y visualmente (Figura 5.50) dicha evolución para una probeta sin recubrir.

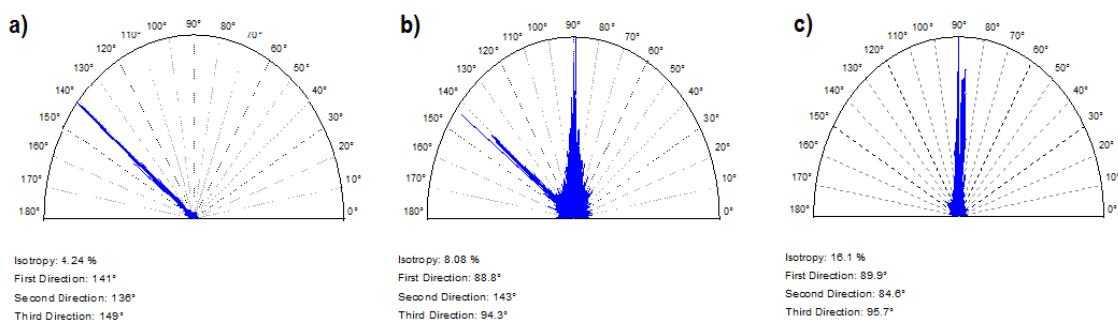


Figura.- 5.49. Gráficos generados por el programa SensoMap para el análisis de superficies donde se muestran las direcciones principales de la textura superficial: a) Estado inicial (mecanizado) b) Después de dos pasadas de polvo de 10 kg (20kg) y c) Después de tres pasadas de polvo (30kg) (dirección relativa al movimiento relativo del polvo en relación a la superficie).



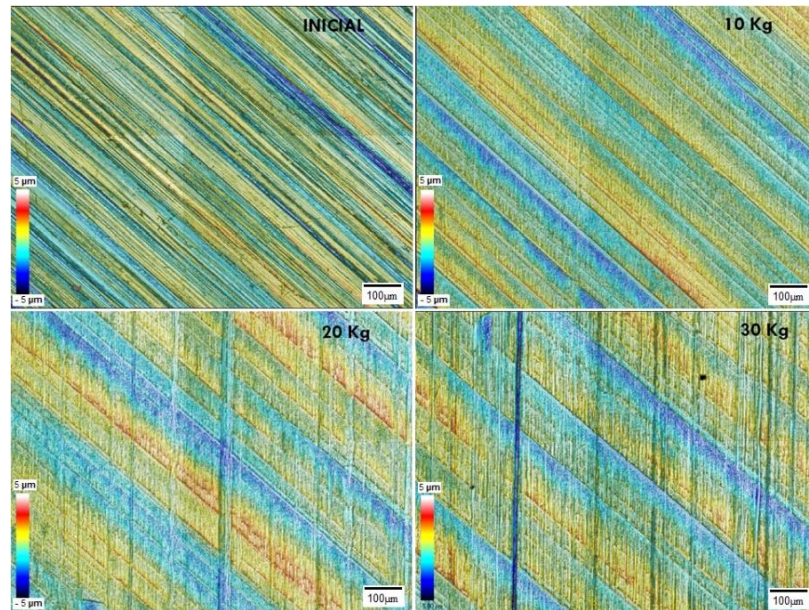


Figura.- 5.50. Imágenes tomadas a 200x mediante microscopía óptica confocal de la superficie de la probeta sin recubrir a lo largo de las diferentes pasadas de 10 kg de polvo.

Si se observa la superficie a 500x al final del ensayo mediante microscopía óptica confocal, podemos observar claramente mecanismos de abrasión (rayado vertical) y adhesión (manchas negras).

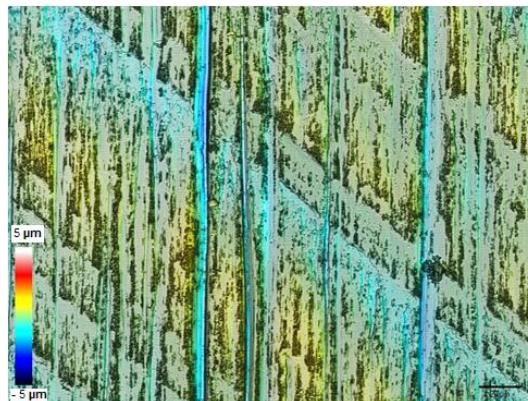


Figura.- 5.51. Imágenes tomadas a 500x mediante microscopía óptica confocal y mediante SEM de la superficie de la probeta sin recubrir al final del ensayo.

Si se observa la misma superficie también a 500x pero mediante la técnica EDX, se observa el degradado del mecanizado y se pueden observar también los carburos (en blanco).



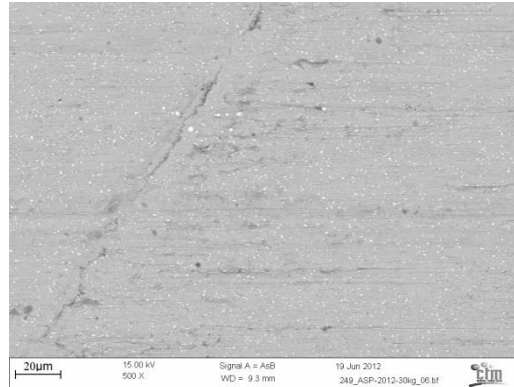


Figura.- 5.52. Imagen tomada mediante EDX a 500x de la superficie de la probeta sin recubrir al finalizar el ensayo.

Sin embargo, si realizamos las mismas observaciones en las probetas recubiertas, nos encontramos que la superficie permanece casi inalterable a lo largo del ensayo.

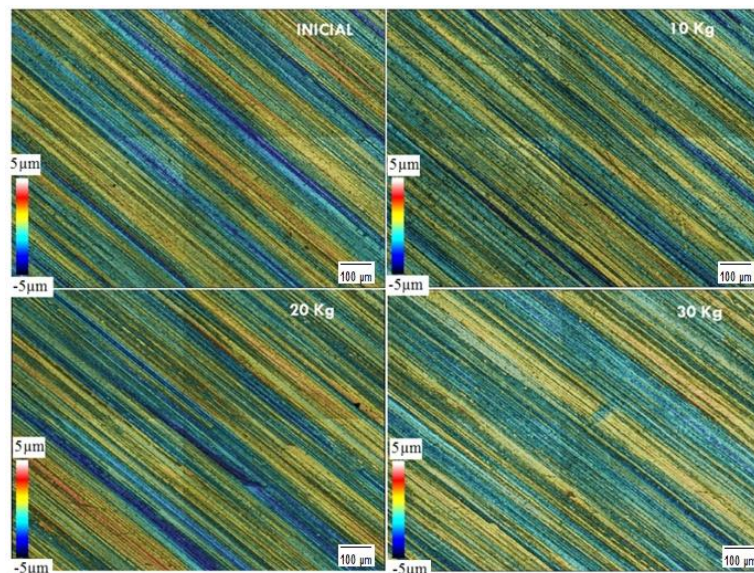


Figura.- 5.53. Imágenes tomadas a 200x mediante microscopía óptica confocal de la superficie de la probeta recubierta lo largo de las diferentes pasadas de 10 kg de polvo.μ

Al observar la superficie al final del ensayo a 500x mediante microscopía confocal, se puede ver claramente como las rayas del mecanizado no han sido deterioradas. Si se observa a 500x mediante EDX, se observa como se ha depositado polvo de hierro (blanco) entre las rayas del mecanizado.



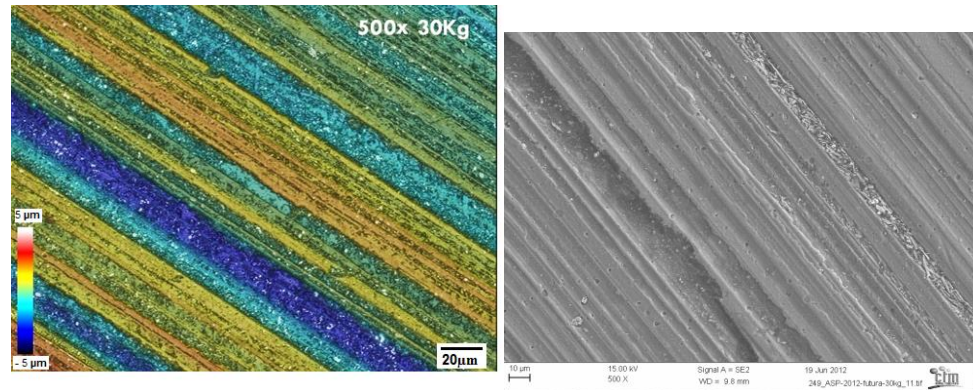


Figura.- 5.54. Imágenes tomadas a 500x de la superficie de la probeta recubierta mediante microscopía confocal (izquierda) y EDX (derecha).

Cuando se observa a 3000x, se diferencia la morfología de las partículas de polvo las cuales se han deformado plásticamente al pasar entre la rueda y la probeta. Se ratifica que las alteraciones de la superficie como rayados o cavidades producidas por el desconche de microgotas son precursoras de los mecanismos de adhesión de material.

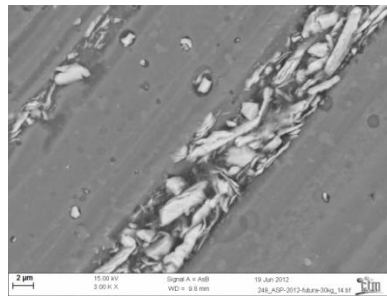


Figura.- 5.55. Imagen tomada mediante SEM a 3000x del polvo adherido al rayado generado por el mecanizado.

Al hacer un “mapping” de los elementos existentes mediante análisis por EDX se puede observar como las partículas de fósforo que se hallan en el polvo son las que interactúan mayormente con los defectos producidos por cavidades de microgotas (defectos y partículas en el rango de magnitud de la micra), mientras que los defectos mayores como el rayado interactúan mayormente con partículas predominantemente de hierro.

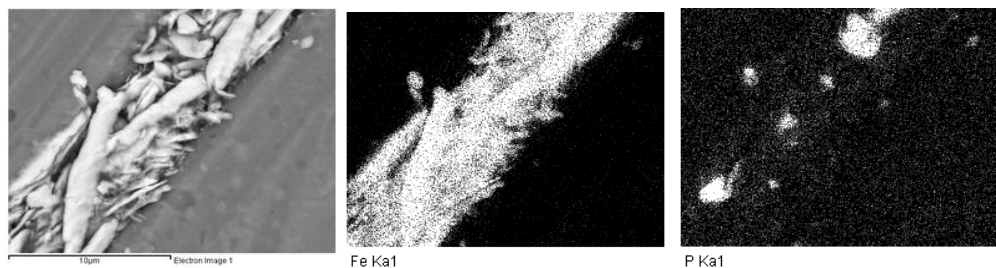


Figura.- 5.56. Mapping de elementos generado mediante EDX. A la izquierda del todo, la imagen analizada, la imagen central muestra donde hay hierro y la imagen de la derecha donde se hayan las partículas de fósforo.



Durante la realización de los ensayos R.W.A.T. se ha observado que las probetas provistas con el recubrimiento BALINIT Futura de AlTiN están magnetizadas. Este fenómeno se ve claramente al poner dichas probetas en contacto con el polvo, quedando éste unido a las probetas siguiendo las líneas del campo magnético (Figura 5.57).



Figura.- 5.57. – La probeta de la izquierda está recubierta, la de la derecha no. Se observa el polvo magnetizado.

La razón de su magnetismo puede venir dada por el fenómeno de deposición que se lleva a cabo para realizar el recubrimiento, la electrodeposición física de vapor o PVD utiliza campos magnéticos para dirigir y condensar el gas sobre la pieza, pudiendo éstos magnetizar la probeta.

5.6.2 Ensayos de fricción y desgaste “Pin on disk”

5.6.2.1 Puesta a punto

Desde un principio se descarta la densidad de $6,8 \text{ g/cm}^3$ puesto que los discos se deshacen muy fácilmente y en caso de ensayarlos se estaría poniendo en riesgo la máquina de ensayos ya que si se deshace el disco, el pin tocaría con las mordazas en rotación. La densidad elegida para la puesta a punto es la densidad media que equivale a 7 g/cm^3 . Siendo también la densidad media de las piezas producidas mediante compactación en el proceso productivo.

En una primera aproximación y para un disco de 7 g/cm^3 y un pin de ASP2012 sin recubrir, se prueba la viabilidad de hacer los ensayos con cargas de 8 y 10N con velocidades angulares de 60 y 100rpm respectivamente. En la Figura 5.58 se grafica la evolución del COF versus la distancia de ensayos. El primer resultado a mencionar es que el disco aguanta. Respecto a la evolución del COF, se observan distintos periodos que responden a diferentes mecanismos de desgaste. Inicialmente, las superficies se acoplan entre ellas (I). Este evento dura hasta los 22 metros en el caso del ensayo a 8N y 60 rpm y hasta las 40 en el ensayo a 10N y 100rpm (II). A continuación el COF se estabiliza hasta que en el caso de los 10N y 100 rpm empieza un estado de transición que no se sabe cuando acaba.



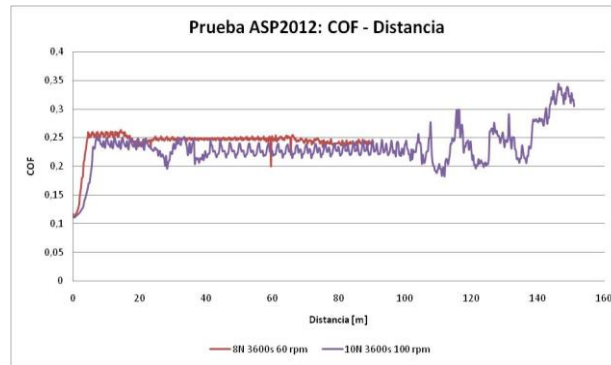


Figura.- 5.58. Resultados de los primeros ensayos Pin on disk.

Como se menciona anteriormente, los diferentes estados que se observan en el ensayo responden a la sucesión de diferentes mecanismos de desgaste. El disco compactado en verde se degrada liberando partículas e incrementando el área de contacto entre el disco y el pin a lo largo del ensayo. La Figura 5.59 lo evidencia.

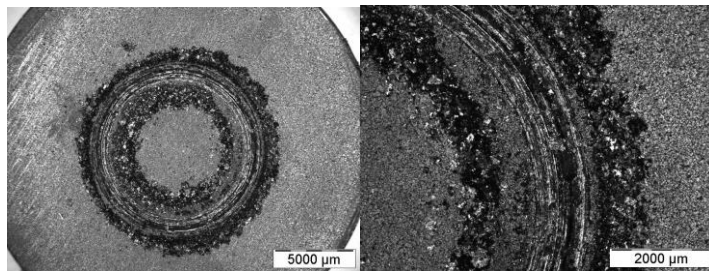


Figura.- 5.59. Disco de densidad 7gr/cm³ después del ensayo de 3600 segundos con una carga de 10N y 100 rpm.

La Figura 5.60.a) y b) muestran el estado inicial y final del pin ensayado. No se observan mecanismos de evidentes de abrasión debido a que la dureza de los pines es mayor que la del polvo pero sí que se observa adhesión de material en la punta del pin (Figura 5.60 c). Esta transferencia de material está en el orden de la décima de miligramo, variación que está fuera del rango de medición aceptable de la báscula pero que modifica el comportamiento del COF cuando ésta aparece.

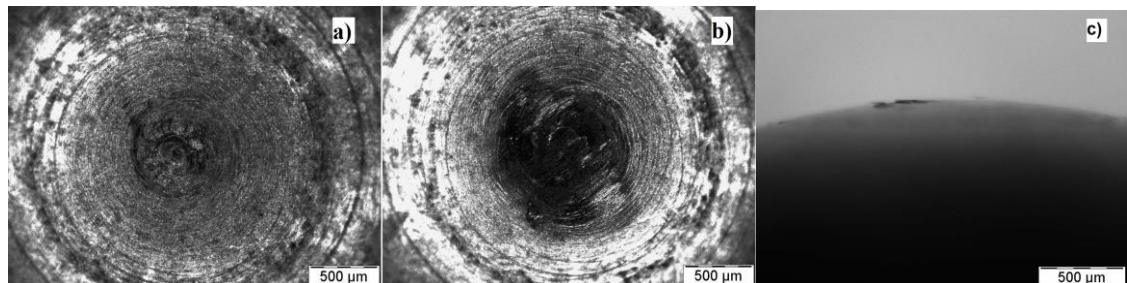


Figura.- 5.60. Imagen tomada mediante lupa óptica a 50x del pin ASP2012 ensayado a 10N durante una hora a 100rpm: a) antes del ensayo; b) después del ensayo y limpiado mediante ultrasonidos y c) imagen de material adherido en la punta del pin después del ensayo y limpiado mediante ultrasonidos.



Se realizan dos ensayos más para cada tipo de pin (ASP2012 con y sin recubrimiento) con la misma densidad de 7 gr/cm^3 del disco, carga de 10N y 100 rpm. Los periodos de estabilidad y transición se repiten y son similares tanto para los pines recubiertos como para los no recubiertos. La diferencia es que para los recubiertos, durante el tiempo de ajuste inicial, el valor del COF decae al contrario que en los no recubiertos que el COF es ascendente.

Se observa también que en el ensayo de los pines recubiertos, el valor del COF medio es casi idéntico en los dos ensayos (0,2 en (II) y 0,23 en (III)) mientras que en los ensayos con los pines no recubiertos el COF es similar en el primer periodo de deslizamiento estable (0,25 en (II)) pero difiere bastante en el segundo periodo de deslizamiento estable (el primer ensayo da un COF de 0,23, similar al COF de los pines recubiertos, sin embargo el segundo ensayo da un COF de 0,27), esto comportamiento puede ser debido a irregularidades en el disco. La Figura 5.61 muestra el resultado de dichos ensayos.

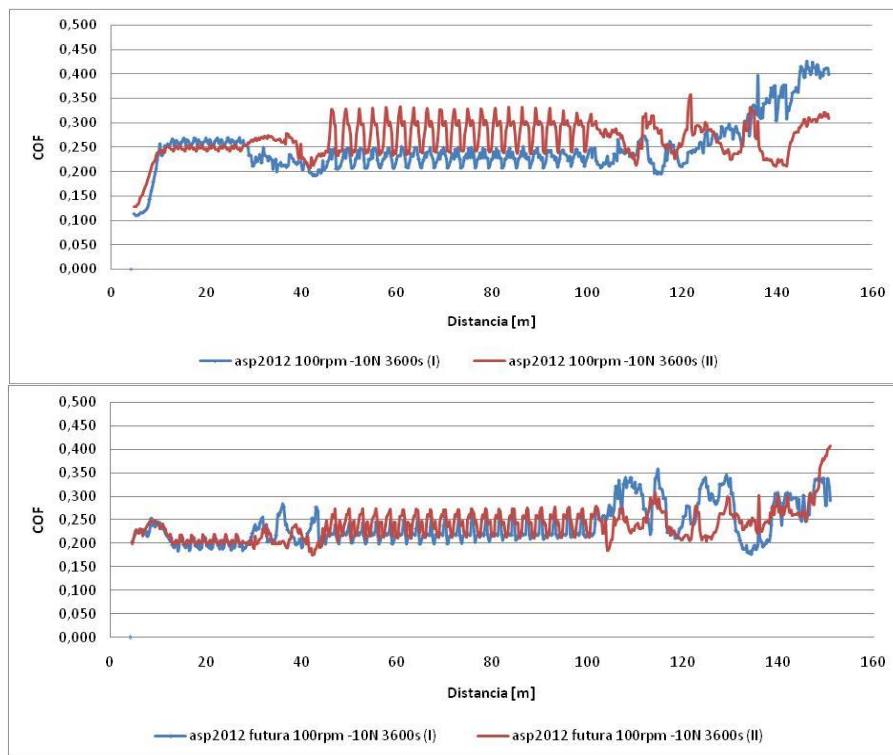


Figura.- 5.61. Resultados de los ensayos “Pin on disk” realizados durante 3600 segundos a 100rpm y una carga de 10 N para dos pines recubiertos y otros dos sin recubrir.

El pin recubierto con AlTiN después del ensayo de una hora no muestra desgaste por abrasión pero sí que se halla adhesión tal y como se muestra en la Figura 5.62 b).



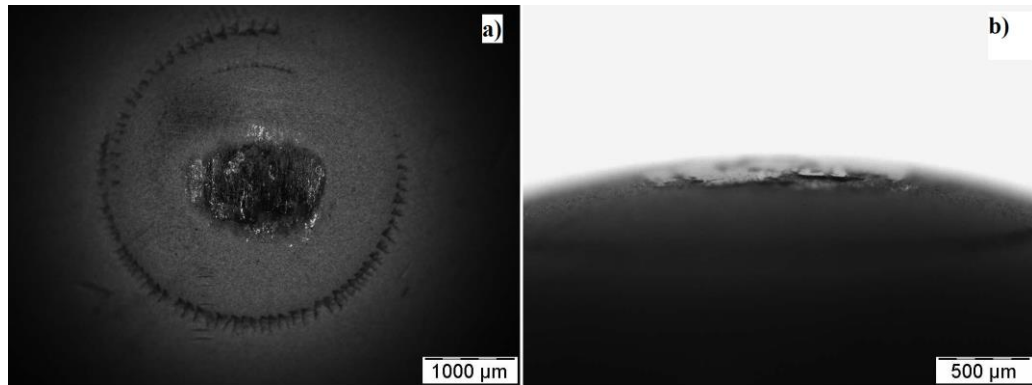


Figura.- 5.62. Imágenes tomadas mediante lupa óptica del pin recubierto con AlTiN después del ensayo bajo las condiciones: 3600 segundos, 10N, y 100rpm: a) Vista superior a 25x; b) Vista frontal a 50x.

Con la intención de comparar resultados con otras condiciones de ensayo y observar la evolución del ensayo durante más tiempo, se realiza un ensayo de tres horas (10800 segundos), dando una longitud de ensayo de 450 metros bajo una carga de 5 Newtons y 100 rpm. La Figura 5.63 muestra los resultados de dichos ensayos.

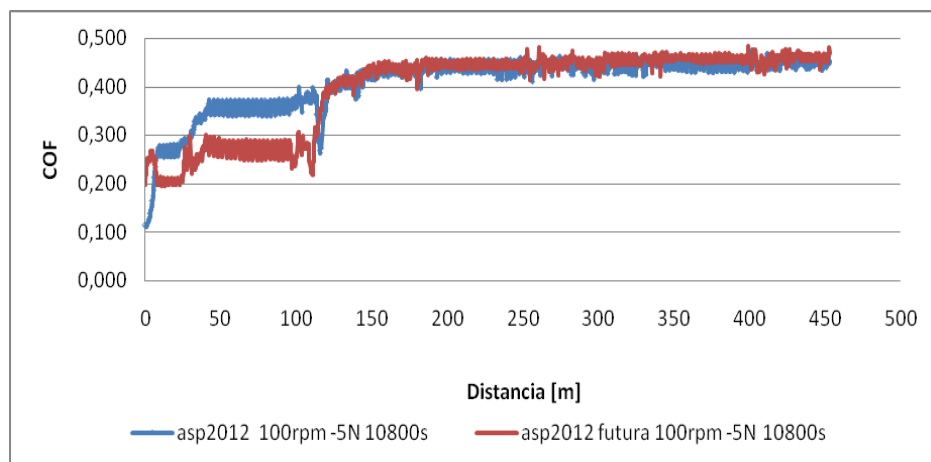


Figura.- 5.63. Resultados de los ensayos “Pin on disk” realizados durante 10800 segundos a 100 rpm y una tensión de 5 N para un pin recubierto y otro sin recubrir.

Al comparar ambos ensayos, se observa que los periodos de transición y deslizamiento estable son casi idénticos en ambos casos, por lo que se puede decir que son independientes del material del pin y dependientes de las propiedades del disco. También observamos que el COF de los pines recubiertos es menor que los no recubiertos excepto en dos situaciones: durante el tiempo de ajuste inicial, siendo superior, donde se liman las asperezas de los materiales en contacto y a partir de los 100 metros de ensayo, que se igualan los valores del COF para ambos materiales.

Observando estos resultados y las imágenes del estado de los pines y los discos antes y después del ensayo, se puede deducir que hasta los 100 metros de ensayo, los mecanismos de desgaste predominantes son los derivados de la abrasión tanto de dos cuerpos (se liman asperezas)



como de terceras partículas provenientes de la liberación del polvo del disco y de las asperezas limadas. A partir de los 100 metros de ensayo, el mecanismo principal es el de adhesión, por eso no se hallan diferencias entre los COF entre los dos tipos de pines, puesto que el par tribológico es el mismo.

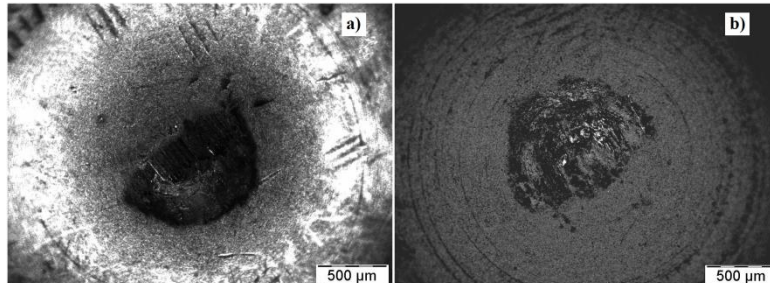


Figura.- 5.64. Imágenes tomadas mediante lupa óptica a 50x de los pines ensayados bajo las condiciones de 10800s, 100rpm y 5N: a) ASP2012; b) BALINIT Futura.

5.6.2.2 Resultados de los ensayos “Pin on disk”

De la puesta a punto de los ensayos “Pin on disk” se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las condiciones óptimas de ensayo son:

Velocidad de giro	100 rpm
Carga	5 Newtons
Densidad disco compactado en verde	7 g/cm³
Distancia de ensayo	>100 metros

Figura.- 5.65. Condiciones óptimas para los ensayos de pin on disk.

Los ensayos tienen como denominador común periodos estables transitorios similares ubicados a distancias muy parecidas, y estas distancias se repiten a diferentes velocidades de giro. Se estima que 100 rpm es una velocidad óptima para el ensayo porque supone una hora de ensayo para conseguir que sucedan los diferentes mecanismos de desgaste.

- Se ha probado la estabilidad del disco de 7 g/cm³ bajo una carga de 5 Newtons durante 10800 segundos.



- Evolución de los mecanismos de desgaste observados en los ensayos:

0 – 50 metros (I)	Tiempo de ajuste inicial. Se liman las asperezas. Se estabiliza el ensayo.
50 – 100 metros (II)	Periodo de deslizamiento estable. Se empieza a generar el surco en el disco compactado en verde. Se sueltan partículas que quedan en el surco. Predominancia de la abrasión por terceras partículas.
100 – 120 metros (III)	Periodo de transición. Las partículas de polvo empiezan a adherirse a la superficie del pin. El COF aumenta.
120 – 450 metros (II b)	Periodo de deslizamiento estable. Las partículas se han adherido a la superficie del pin. Predominancia del mecanismo de abrasión cuerpo a cuerpo. No hay diferencia entre los COF.

Figura.- 5.66. Evolución de los mecanismos de desgaste en los ensayos Pin On Disk.

El ensayo permite comparar la evolución del COF de los materiales y a lo largo de la sucesión de 3 mecanismos de desgaste en los que se ven implicados directamente: abrasión cuerpo a cuerpo en el estado inicial donde predomina la textura del mecanizado, abrasión por terceras partículas por el desgaste de ambas superficies pero sobre todo por el desprendimiento de partículas del disco y abrasión cuerpo a cuerpo junto a adhesión de material en la superficie del pin que va incrementando su superficie hasta abarcar su mayoría, punto donde se igualan los COF entorno el valor de 0,40.

Como variables a destacar en dicha comparación se proponen:

- Las distancias a las que empiezan cada uno de los estados transitorios relacionados con los diferentes mecanismos de desgaste. A mayor distancia, mejor resistencia al desgaste.
- El COF de los materiales.



6. Conclusiones generales

Las conclusiones más relevantes de este proyecto se definen en los siguientes puntos:

- Se ha utilizado con éxito la silicona de vinilpolisiloxano o “material de impresión VPS” como material para reproducir superficies. Esta silicona permite analizar la evolución de la superficie de las herramientas a lo largo de su vida en servicio sin tener que desmontar la herramienta. Su facilidad de aplicación, su velocidad de polimerización, su fiabilidad, su bajo coste y el hecho de no tener que desmontar la herramienta, convierten esta técnica en un gran avance para el análisis de la evolución de superficies “in situ”.
- Se han estudiado los mecanismos de desgaste generados en herramientas involucradas en procesos de pulvimetalurgia (noyos y punzones) a lo largo de su vida en servicio, hallándose mecanismos de adhesión, desgaste abrasivo, rotura por fatiga, deformación plástica, fractura y desconche del recubrimiento de AlTiN. Respecto a los noyos, de material ASP2012, el mecanismo de desgaste más comprometedor se halla en la zona inferior de los pines, zona en contacto con el polvo de sinterizado en el momento de la compactación. En el caso de los punzones, al estar recubiertos con el recubrimiento comercial Balinit Futura Nano, los mecanismos de desgaste abrasivo dejan lugar a la adhesión del polvo de sinterizado y sobre todo a fracturas y desconches del recubrimiento en zonas entalladas.
- De los diferentes parámetros superficiales de los cuales se ha estudiado su evolución durante la vida de las herramientas, se presenta la “Dirección de la textura superficial” como el parámetro más significativo. Este parámetro permite ver claramente como se pasa de una textura superficial condicionada por el mecanizado de la herramienta, con o sin recubrimiento, a una textura donde predomina la dirección de deslizamiento relativa al polvo durante la compactación. Este parámetro es el más fácil de relacionar con los resultados de los ensayos de RWAT.
- De la puesta a punto, se establece como óptimo el ensayo de RWAT donde la carga es de 350N, a 150 rpm, y se efectúan 3 pasadas de 10 kg de polvo (sin cambiar el polvo). Los ensayos de RWAT han permitido observar que las probetas con recubrimiento Balinit Futura Nano no padecen casi de desgaste abrasivo en comparación con las probetas no recubiertas. También se ha observado mediante SEM que partículas de polvo de sinterizado quedan atrapadas en las imperfecciones de la superficie como surcos o microgotas y que dichas partículas quedan más o menos deformadas según su composición. Las partículas de Fósforo no presentan deformación y presentan una superficie más angulada que las base hierro, pudiendo ser más abrasivas.
- La puesta a punto de los ensayos Pin on Disk ha permitido definir la distancia de ensayo mínima para poder comparar diferentes materiales bajo 3 mecanismos de desgaste como son abrasión cuerpo a cuerpo, abrasión por terceras partículas y adhesión.



- Se ha observado que las probetas recubiertas de AlTiN presentan magnetismo debido al proceso de PVD con el que se deposita el recubrimiento. Este fenómeno puede condicionar su comportamiento al entrar en contacto con el polvo facilitándose la adhesión de éste a la superficie de la herramienta, sin embargo, las probetas recubiertas mantienen su morfología superficial durante un tiempo más prologando que las no recubiertas.



7. Análisis medioambiental

El proyecto que aquí se presenta se embarca dentro de un proyecto mucho mayor el cual pretende aumentar la competitividad del sector pulvimetalúrgico permitiendo que éste pueda afrontar producciones en campos como la informática, electrónica, piezas para uso doméstico, máquinas industriales, medicina, cuidado personal, alimentación e incluso piezas del alto valor añadido como componentes magnéticos de relevancia en el potencial mercado de los vehículos eléctricos. Esto significa que hacer una estimación apurada del impacto medioambiental que puede inducir el proyecto en el cual este proyecto está embebido es imposible. Sin embargo, durante el proyecto que se ha realizado, el agua empleada para la preparación de muestra para su caracterización posterior en el SEM, así como los líquidos para la preparación de muestras como el etanol y la acetona han sido gestionados según la norma ISO14001 [13].

En la siguiente tabla se puede presentar el cálculo de emisiones de CO₂ relativas a realización del proyecto. Para el cálculo de las emisiones se han tomado los valores relativos al documento “*Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Generalitat de Catalunya Comisión Interdepartamental del Cambio Climático. 2012*” [14]. En este documento se define también el término “mix eléctrico”, el cual define las emisiones de CO₂ por kW producido en España, así como las pérdidas de transporte y distribución. Las emisiones del “mix eléctrico” del año 2011 son de 267 g CO₂/kW [14] y las emisiones totales estimadas de la realización de este proyecto son de 44,3 kg de CO₂.

Equipo	Horas de trabajo	Distancia (km)	Consumo (kW/h)	Energía (kW)	Emisiones CO ₂ (kg)
Ordenador	350		0,3	105	28,4
Vehículo turismo		400	(gasoil 1,57 g CO ₂ /km)		0,63
Máquina ensayo Pin On Disk	35		0,4		3,73
Máquina ensayo RWAT	72		0,6		11,53
Total emisiones					44,3

Figura.- 7.1. Emisiones de CO₂ generadas a causa de la realización del proyecto.



8. Presupuesto

En la siguiente tabla se presenta el presupuesto asociado a la realización de este proyecto. El presupuesto incluye los siguientes conceptos:

- ✓ Costes de los procesos experimentales:
 - De toma de muestras y preparación de las mismas.
 - Coste de la realización de ensayos para la puesta a punto
- ✓ Costes del análisis.
- ✓ Costes del trabajo realizado por el proyectista.

En el apartado correspondiente a los procesos experimentales se incluyen los costes de utilización de los equipos así como las horas de trabajo del técnico. En la preparación de muestras, la caracterización SEM y EDX se incluye el coste asociado al técnico. Como se muestra en la siguiente tabla, el coste total del proyecto asciende a 10498€.

CONCEPTO	Unidades	Coste unidad (€/unidad)	Coste (€)
EXPERIMENTAL			
Material de impresión VPS	8	15	120
Probeta RWAT ASP2012	6	20	120
Probeta RWAT Balinit Futura Nano	6	22	132
Probeta Pin on disc ASP2012	4	17	68
Probeta Pin on disc Balinit Futura Nano	3	19	57
Polvo de sinterizado	55	5	275
Discos Pin on disc	8	3	24
Total Experimental			796
ANÁLISIS			
Microscopía confocal (h)	34	103	3502
SEM (h)	12	250	3000
Microscopía óptica (h)	10	50	500
Total análisis			7002
PROYECTISTA			
Horas Proyectista	337,5	8	2700
Total proyectista			2700
TOTAL PROYECTO			10498

Figura.- 8.1. Desglose del coste del proyecto.



9. Agradecimientos

Agradecer a los Doctores José Manuel Prado y Daniel Caselles por haberme permitido realizar este proyecto en el Centro Tecnológico de Manresa. Agradecer la entrega tanto a las Doctoras Montserrat Vilaseca y Gisela Ramírez, mis tutoras en dicho proyecto por hacerme de guías y ayudarme a llevar a cabo este proyecto. Del mismo centro me gustaría también dar las gracias tanto a Iban González (responsable del SEM), Jaume Pujante y Raül Bonet, buenos compañeros del departamento de tribología.

En lo personal, dar las gracias a mi familia por su apoyo incondicional.



10. Bibliografía y páginas web.

- [1] *Characterization of abrasive wear in forming tools with polymeric replica profiles.* **G. Ramírez, M. Vilaseca, J. Pujante, D. Casellas.** Proceedings of 15th Nordic Symposium on Tribology NORDTRIB 2012, Trondheim (Noruega).
- [2] *Adhesive wear analysis of PVD coated and uncoated hot stamping tools.* **M. Vilaseca, J. Pujante, G. Ramírez, D. Casellas.** Proceedings of 15th Nordic Symposium on Tribology NORDTRIB 2012, Trondheim (Noruega).
- [3] *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin on Disk Apparatus.* Norma ASTM G99.
- [4] *Standard Test Methods for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.* ASTM G65-04.
- [5]. *Caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos duros.* **Maryory Astrid Gómez Botero.** Memóriadoctorado UB 2005.
- [6] *Friction, Lubrication and Wear Technology.* ASM Metals Handbook Vol. 18:
- [7] *Handbook of Tribology: Materials, Coatings and Surface Treatments.* **Bhushan, B. & Gupta, B. K.** McGraw-Hill, New York, 1991, p.346.
- [8] *Powder Metallurgy: Processing and Materials.* **Schatt, W., Wieters, K.P.** European Powder Metallurgy Association (1997).
- [9] *Powder Metal Technologies and Applications,* ASM Handbook 7 (2010).
- [10]. *Abrasive wear of high speed steels: Influence of abrasive particles and primary carbides on wear resistance.* **E. Badisch, C. Mitterer.** Tribology International 36 (2003).765 -770.
- [11] *Areal - Terms, definitions and surface texture parameters.* ISO 25178-2 (2010)
- [12]. *Abrasive wear behavior of D2 tool steel with respect to load and sliding speed under dry sand/rubber wheel abrasion condition.* **X. Ma, R. Liu, DY Li.** Wear 241(2000). 79 - 85
- [13] *Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso.* ISO 14001:2004
- [14] *Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).* Generalitat de Catalunya Comisión Interdepartamental del Cambio Climático. 2012.
- [SBTCH] www.substech.com
- [FIEE] www.fiee.com.br/es



[BALZ] www.balzers.ch

[TECNUN] www.tecnun.es/asignaturas/pulvimetal/pagina_4.html

